



Universidad
Carlos III de Madrid

EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE CALEFACCIÓN POR SUELO RADIANTE

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA TÉRMICA Y DE FLUIDOS

PROYECTO FIN DE CARRERA
INGENIERIA TECNICA INDUSTRIAL

AUTOR: ANTONIO HINOJOSA MATEO

TUTOR: Dr. MARCELO IZQUIERDO MILLÁN

INDICE

LISTADO DE FIGURAS	5
LISTADO DE TABLAS	8
1. OBJETIVO DEL PROYECTO	10
2. CALCULO DEL LAS CARGAS TERMICAS DE CALEFACCION	10
2.1 Descripción del edificio	10
2.2 Condiciones iniciales	11
2.3 Calculo del coeficiente de transmisión de calor	12
2.4 Coeficiente global del edificio K_G	19
2.5 Cargas térmicas de calefacción	21
2.5.1 Carga de transmisión	21
2.5.2 Carga térmica de ventilación e infiltración	22
2.5.3 Cargas internas	24
3. MÉTODO DE CÁLCULO Y DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMAS DE SUELO RADIANTE	
(SEGÚN UNE EN 1264)	27
4. SUELO RADIANTE	32
4.1 Criterios de diseño de un suelo radiante	32
4.2 Diseño y dimensionamiento del suelo radiante	35
4.3 Variación de la temperatura del suelo	47
4.3.1 Variación de la temperatura en cada tramo de tubería	47
4.3.2 Variación de temperatura entre las tuberías	52
4.4 Resultados	58
5. RESUMEN DE RESULTADOS	65
6. FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA INERCIA TÉRMICA DE LOS MATERIALES	69
7. SIMULACIÓN EN RÉGIMEN TRANSITORIO	71
7.1 Cálculo de cargas que actúan en el local	75
7.2 Cálculo de las cargas de calor que actúan sobre las superficies	76
7.3 Cálculo de la temperatura de los muros y techo	77

7.4	Cálculo de las temperaturas de las particiones del suelo.....	77
7.5	Cálculo de la temperatura del aire del local.....	81
7.6	Cálculo de la temperatura superficial del suelo	81
7.7	Simulación	82
7.7.1	28 de Noviembre.....	85
7.7.2	28 de Diciembre	91
7.7.3	14 de Enero	95
7.7.4	12 de Febrero	99
7.7.5	8 de Marzo	103
7.7.6	16 de Abril.....	108
7.7.7	Comparación de resultados.....	113
8.	METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE LA CAPACIDAD TÉRMICA GLOBAL	118
8.1	Resultados de la aplicación del método.....	123
8.1.1	28 de Noviembre.....	123
8.1.2	28 de Diciembre	124
8.1.3	14 de Enero	125
8.1.4	12 de Febrero.....	126
8.1.5	8 de Marzo.....	127
8.1.6	16 de Abril.....	128
9.	COMPARACION DE RESULTADOS.....	130
10.	CONCLUSION.....	133
11.	BIBLIOGRAFIA.....	134
12.	ANEXOS	
	ANEXO A: <i>Propiedades del aire a presión atmosférica para temperaturas entre 250 y 300 K.....</i>	136
13.	ANEXO B: <i>Planos del local.....</i>	137

LISTA DE FIGURAS

CAPITULO 2

Figura 2.1. Plano del local	10
Figura 2.2. Composición del suelo	13
Figura 2.3. Composición de muros y techo.....	17

CAPITULO 3

Figura 3.1. Composición de resistencias de un suelo con sistema radiante.....	29
Figura 3.2. Curva característica básica	30

CAPITULO 4

Figura 4.1. Configuración suelo radiante	32
Figura 4.2. Configuraciones de las tuberías	32
Figura 4.3. Distribución de temperaturas en función del sistema de calefacción.....	32
Figura 4.4. Configuración doble serpentín	35
Figura 4.5. Disposición de los circuitos.....	36
Figura 4.6. Curva característica básica	37
Figura 4.7. Evolución de la temperatura del terreno con la profundidad	40
Figura 4.8. Diagrama de Moody	44
Figura 4.9. Perdida de presión en circuitos	45
Figura 4.10. Punto característico de funcionamiento de la instalación (22A UPONOR).....	46
Figura 4.11. Perfil de temperatura en un suelo radiante de doble serpentín	47
Figura 4.12. Tramo del circuito de tuberías	48
Figura 4.13. Tubería enterrada sin aislamiento	50
Figura 4.14 Incremento máximo de temperatura en el suelo	52
Figura 4.15. Red general de resistencias del suelo.....	53
Figura 4.16. Red de resistencias del suelo.....	54
Figura 4.17. Configuración tubos empotrados.....	55
Figura 4.18. Relación de tramos de impulsión y retorno.....	58

Figura 4.19. Temperatura media a lo largo del punto medio del eje en el plano de los tubos. 60

Figura 4.20. Perfil de temperaturas a nivel de los tubos..... 61

CAPITULO 5

Figura 5.1. Calor en dirección descendente..... 65

Figura 5.2. Calor en dirección ascendente 66

Figura 5.3. Calor por convección 66

Figura 5.4. Calor por radiación..... 67

Figura 5.5. Calor por conducción en dirección lateral..... 67

CAPITULO 7

Figura 7.1. Particiones del suelo..... 73

Figura 7.2. Red de resistencias de las particiones del suelo..... 79

Figura 7.3. Evolución de la temperatura exterior en el mes de Noviembre..... 86

Figura 7.4. Evolución de la temperatura exterior para el día 28/11/2011 86

Figura 7.5. Carga térmica de calefacción para el periodo de conexión del 28 de Noviembre..87

Figura 7.6. Comportamiento del suelo en el mes de Noviembre 88

Figura 7.7. Evolución de las temperaturas en la desconexión y conexión 89

Figura 7.8. Evolución de la temperatura exterior en el mes de diciembre..... 91

Figura 7.9. Evolución de la temperatura exterior para el día 28/12/2011 91

Figura 7.10. Carga térmica de calefacción para el periodo de conexión del 28 de Diciembre.92

Figura 7.11. Comportamiento del suelo en el mes de Diciembre..... 93

Figura 7.12. Evolución de la temperatura exterior en el mes de Enero 95

Figura 7.13. Evolución de la temperatura exterior para el día 14/01/2012 95

Figura 7.14. Carga térmica de calefacción para el periodo de conexión del 14 de Enero 96

Figura 7.15. Comportamiento del suelo en el mes de Enero..... 97

Figura 7.16. Evolución de la temperatura exterior en el mes de Febrero 99

Figura 7.17. Evolución de la temperatura exterior para el día 12/02/2012 99

Figura 7.18. Carga térmica de calefacción para el periodo de conexión del 12 de Febrero 100

<i>Figura 7.19. Comportamiento del suelo en el mes de Febrero.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 7.20. Evolución de la temperatura exterior en el mes de Marzo</i>	<i>103</i>
<i>Figura 7.21. Evolución de la temperatura exterior para el día 08/03/2012</i>	<i>103</i>
<i>Figura 7.22. Carga térmica de calefacción para el periodo de conexión del 8 de Marzo</i>	<i>104</i>
<i>Figura 7.23. Comportamiento del suelo en el mes de Marzo.....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 7.24. Evolución de las temperaturas en la desconexión y conexión del sistema</i>	<i>106</i>
<i>Figura 7.25. Evolución de la temperatura exterior en el mes de Abril</i>	<i>108</i>
<i>Figura 7.26. Evolución de la temperatura exterior para el día 16/04/2012</i>	<i>108</i>
<i>Figura 7.27. Carga térmica de calefacción para el periodo de conexión del 16 de Abril</i>	<i>109</i>
<i>Figura 7.28. Comportamiento del suelo en el mes de Abril.....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 7.29. Evolución de las temperaturas en la desconexión y conexión del sistema</i>	<i>111</i>
<i>Figura 7.30. Comparación temperaturas mínimas exteriores °C</i>	<i>113</i>
<i>Figura 7.31. Temperatura media de cada día °C.....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 7.32. Comparación temperaturas del ambiente interior</i>	<i>114</i>
<i>Figura 7.33. Comparación temperaturas superficiales del suelo °C.....</i>	<i>116</i>

LISTA DE TABLAS

CAPITULO 2

Tabla 2.1. Resistencias térmicas superficiales de cerramientos en contacto con el aire exterior (m^2K/W).....	11
Tabla 2.2. .Resistencias térmicas de cámaras de aire (m^2K/W).....	12
Tabla 2.3. Valores límite del coeficiente global de transferencia de calor para cerramientos y particiones interiores ($W/m^2\ ^\circ C$)	12
Tabla 2.4. Valores límite para la zona climática D3.....	12
Tabla 2.5. Características de los materiales que componen el suelo.....	13
Tabla 2.6. Coeficiente global de transferencia de calor U_s para suelos en contacto con el terreno (W/m^2K).....	14
Tabla 2.7. Características de los materiales que componen el muro exterior	15
Tabla 2.8. Características de los materiales que componen el techo	15
Tabla 2.9. Características de las ventanas	16
Tabla 2.10. Composición de la puerta.....	16
Tabla 2.11. Comparación de la transmisión máxima en cerramientos.....	17
Tabla 2.12. Comparación de los valores límites	17
Tabla 2.13 Valor límite máximo de K_G	18
Tabla 2.14. Resultado del producto del coeficiente global de transmisión de calor por el área de cada cerramiento	19
Tabla 2.15 Carga térmica de cada cerramiento y carga térmica total	21
Tabla 2.16. Datos para la carga de ventilación.....	22
Tabla 2.17. Cargas internas por sistemas eléctricos.	23
Tabla 2.18. Cargas internas por ocupación.....	23

CAPITULO 4

Tabla 4.1. Características de los circuitos	35
Tabla 4.2. Materiales en dirección descendente.....	38
Tabla 4.3. Materiales en dirección ascendente.....	39
Tabla 4.4. Temperaturas en el punto medio de cada tramo de tubería	60

CAPITULO 5

Tabla 5.1. Rango temperaturas del suelo	65
Tabla 5.2. Propiedades del suelo.....	65
Tabla 5.3. Características del sistema de suelo radiante	68

CAPITULO 7

Tabla 7.1. Características del circuito	72
Tabla 7.2. Características del local.....	72
Tabla 7.3.Composición de muros y techo.....	72
Tabla 7.4. Propiedades de los materiales que componen el suelo.....	74
Tabla 7.5. Datos del suelo	75
Tabla 7.6. Propiedades de los materiales situados por encima de los tubos.....	90
Tabla 7.7 Cargas térmicas totales para los días de Simulación	114
Tabla 7.8. Efectividad de la inercia térmica	115
Tabla 7.9. Resultado coeficiente entre temperatura interior y exterior.....	115
Tabal 7.10. Calor transmitido por el suelo en el periodo de desconexión.....	116
Tabla 7.11. Calor transmitido al suelo en el periodo de calefacción.....	117

CAPITULO 8

Tabla 8.1. Coeficientes de convección natural en ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)	121
Tabla 8.2. Calor transmitido por el suelo en el periodo de desconexión.....	129

CAPITULO 9

Tabla 9.1. Temperatura superficial del suelo a las 18:00h.....	130
Tabla 9.2. Temperatura superficial del suelo al día siguiente, a las 8:00 horas	131
Tabla 9.3. Calor transmitido por el suelo en el periodo de desconexión en ambos métodos..	131

1. OBJETIVO DEL PROYECTO

Este proyecto tiene como objetivo realizar la evaluación de un sistema de calefacción por suelo radiante en régimen transitorio. Para ello, realizaremos la climatización y el diseño y dimensionamiento del sistema de calefacción por suelo radiante para un edificio situado en Madrid.

En régimen estacionario, obtendremos la carga térmica del local, que determinará la energía y potencia necesaria a suministrar por la instalación y calcularemos las temperaturas más representativas que intervienen en el diseño de un sistema radiante, temperatura media superficial del suelo y temperatura media en el eje de los tubos, además de las pérdidas térmicas que se producen en el suelo en régimen estacionario para una temperatura de confort de 21°C

El sistema de calefacción funcionará 10 horas, conectándose a las 8:00 horas hasta las 18:00 horas. Durante el periodo de desconexión, los muros, suelo, etc. transmiten calor al ambiente interior, reduciendo su temperatura durante este periodo. Éste calor transmitido deberá ser aportado por el sistema de calefacción cuando se conecte al día siguiente.

Realizaremos una simulación en régimen transitorio donde calcularemos, el calor transmitido por el suelo y su efecto sobre la temperatura interior del local y la demanda de calefacción, y comprobaremos, haciendo uso de la normativa vigente, si el sistema de calefacción es capaz de alcanzar la temperatura de confort en el interior. Se representará las temperaturas más representativas de los días más fríos de cada mes del periodo que comprende el uso de calefacción, que va desde el 1 de Noviembre al 30 de Abril.

Analizando exclusivamente el suelo, calcularemos el calor transmitido por éste durante el periodo de desconexión del sistema, comprendido entre las 18:00 horas y las 8:00 horas del día siguiente, aplicando el método de la capacidad térmica global, y compararemos los resultados obtenidos con los de la simulación.

2. CÁLCULO DE LAS CARGAS TÉRMICAS DE CALEFACCIÓN

Para poder determinar la potencia térmica del local para cubrir su demanda de calefacción, deberemos realizar un balance de pérdidas de calor (cerramientos y efectos de la renovación e infiltración del aire exterior) y las ganancias de calor (equipos eléctricos y personas).

2.1 DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO

El edificio está situado en la ciudad de Madrid. La determinación de la zona climática se recoge en el CTE DB HE1 en el que se establecen 12 zonas climáticas identificadas mediante una letra, correspondiente a la división de invierno, y un número, correspondiente a la división de verano. Así nuestro edificio se sitúa en la **zona D3**.

Consta de una planta de 3m de altura y sus cerramientos están formados por:

- Muros y techo: formados por un bloque de hormigón, aislante de poliuretano expandido y enlucido de yeso.

- Suelo radiante
- Ventanas de cristal doble con cámara de aire de 5mm de 0,4 m².
- Puertas de contrachapado con aislante de poliuterano expandido de 1,82 m².

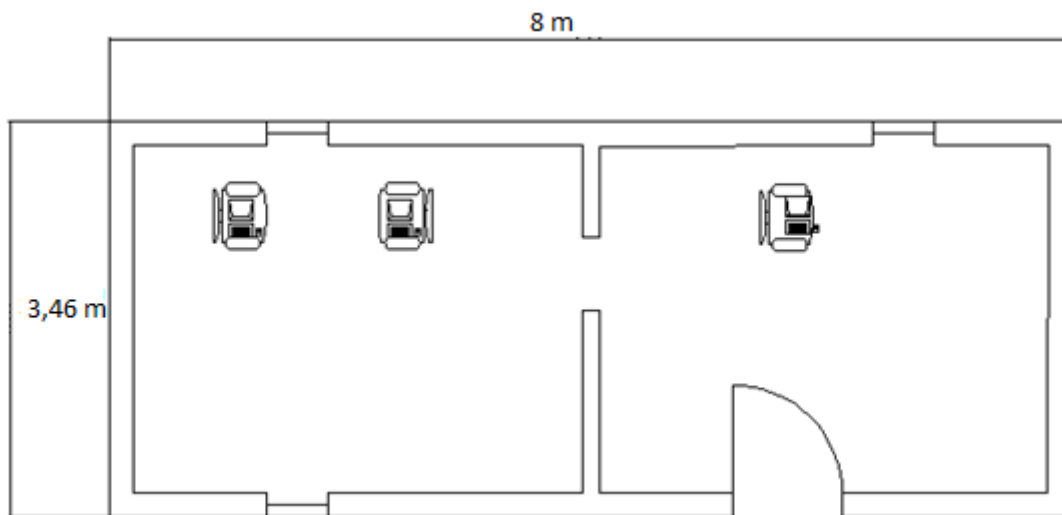


Figura 2.1. Plano del local. Planta.

A efectos de cálculo de la demanda energética, el edificio a estudiar será un espacio de baja carga interna. Y a efectos de comprobación de la limitación de condensaciones, UNE EN 13788:2002, será espacios de clase higrometría 3 o inferior: espacios en los que no se prevea una alta producción de humedad.

El tiempo de funcionamiento de la instalación será de 10h comenzando a las 8:00 h y apagándose a las 18:00 h.

El nivel de ocupación del edificio será de 3 personas.

2.2 CONDICIONES INICIALES

Condiciones exteriores de cálculo para invierno

Los datos siguientes están extraídos de la Guía técnica de Condiciones Climáticas Exteriores de Proyecto y norma UNE 100001, para la ciudad de Madrid.

- | | |
|-------------------------------|----------------------------------|
| - Temperatura de bulbo seco | 6°C (Temperatura media más baja) |
| - Temperatura de bulbo húmedo | 21,2°C |
| - Temperatura del terreno | 6°C |
| - Velocidad del viento | 2,7 m/s |

Condiciones interiores de diseño para invierno

Obtenidos según IT 1 Diseño y Dimensionado del RITE donde en función de la actividad metabólica de las personas y su grado de vestimenta se obtiene las condiciones interiores para satisfacer el bienestar térmico para el confort de los ocupantes:

- Temperatura operativa entre 21 y 23°C
- Humedad relativa de 40% a 50%
- Velocidad media del aire, 0,1 a 0,16 m/s
- Caudal de ventilación: mínimo 1 renovación/hora (Según DB HS)

2.3 CALCULO DEL COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN DE CALOR

Para el cálculo de los distintos coeficientes de transmisión de calor, utilizaremos la expresión del NBE-CT-79, según (2.1):

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_e} + \frac{1}{h_i} + \sum \frac{e_i}{\lambda_i}} \quad (2.1)$$

Donde:

h_e , Coeficiente superficial de transmisión de calor exterior (W/m²°C). Dado por CTE DB HE tabla E.1

h_i , Coeficiente superficial de transmisión de calor interior (W/m²°C). Dado por CTE DB HE tabla E. 1

e_i , Espesor de cada capa de material (m).

λ_i , Conductividad térmica de cada material (W/m°C), según NBE-CT-79.

Las resistencias térmicas superficiales de cerramientos en contacto con el aire exterior e interior en m²K/W, se extraen de la tabla 2.1 según CTE:

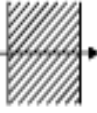
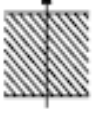
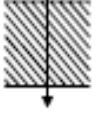
Posición del cerramiento y sentido del flujo de calor		R _{se}	R _{si}
Cerramientos verticales o con pendiente sobre la horizontal >60° y flujo horizontal		0,04	0,13
Cerramientos horizontales o con pendiente sobre la horizontal ≤60° y flujo ascendente		0,04	0,10
Cerramientos horizontales y flujo descendente		0,04	0,17

Tabla 2.1. Resistencias térmicas superficiales de cerramientos en contacto con el aire exterior (m²K/W)

Las resistencias térmicas de cámaras de aire se obtienen de la tabla según CTE.

e (cm)	Sin ventilar	
	horizontal	vertical
1	0,15	0,15
2	0,16	0,17
5	0,16	0,18

Tabla 2.2. Resistencias térmicas de cámaras de aire (m²K/W)

Según el CTE DB HE 1, las transmisiones térmicas máximas de cerramientos y particiones interiores según la zona climática, son:

Cerramientos y particiones interiores	ZONAS A	ZONAS B	ZONAS C	ZONAS D	ZONAS E
Muros de fachada, particiones interiores en contacto con espacios no habitables, primer metro del perímetro de suelos apoyados sobre el terreno ⁽¹⁾ y primer metro de muros en contacto con el terreno	1,22	1,07	0,95	0,86	0,74
Suelos ⁽²⁾	0,69	0,68	0,65	0,64	0,62
Cubiertas ⁽³⁾	0,65	0,59	0,53	0,49	0,46
Vidrios y marcos	5,70	5,70	4,40	3,50	3,10
Medianerías	1,22	1,07	1,00	1,00	1,00

Tabla 2.3. Valores límite del coeficiente global de transferencia de calor para cerramientos y particiones interiores (W/m² °C)

En nuestro caso nos encontramos en Madrid, zona climática D3, en el que los valores límites de los parámetros característicos establecidos para los cerramientos y particiones interiores son los siguientes:

ZONA CLIMÁTICA D3

Transmitancia límite de muros de fachada y
cerramientos en contacto con el terreno $U_{Mlim}: 0,66 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
Transmitancia límite de suelos $U_{silm}: 0,49 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
Transmitancia límite de cubiertas $U_{clim}: 0,38 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
Factor solar modificado límite de lucernarios $F_{Llim}: 0,28$

% de superficie de huecos	Transmitancia límite de huecos ⁽¹⁾ $U_{Hlim} \text{ W/m}^2 \text{ K}$				Factor solar modificado límite de huecos F_{Hlim}					
					Carga Interna baja			Carga Interna alta		
	N	E/O	S	S/E/SO	E/O	S	S/E/SO	E/O	S	S/E/SO
de 0 a 10	3,5	3,5	3,5	3,5	-	-	-	-	-	-
de 11 a 20	3,0 (3,5)	3,5	3,5	3,5	-	-	-	-	-	-
de 21 a 30	2,5 (2,9)	2,9 (3,3)	3,5	3,5	-	-	-	0,54	-	0,57
de 31 a 40	2,2 (2,5)	2,6 (2,9)	3,4 (3,5)	3,4 (3,5)	-	-	-	0,42	0,58	0,45
de 41 a 50	2,1 (2,2)	2,5 (2,6)	3,2 (3,4)	3,2 (3,4)	0,50	-	0,53	0,35	0,49	0,37
de 51 a 60	1,9 (2,1)	2,3 (2,4)	3,0 (3,1)	3,0 (3,1)	0,42	0,61	0,46	0,30	0,43	0,32

Tabla 2.4. Valores límite para la zona climática D3

• Suelo

Cerramiento en contacto con el terreno a una profundidad no superior a 0,5m.

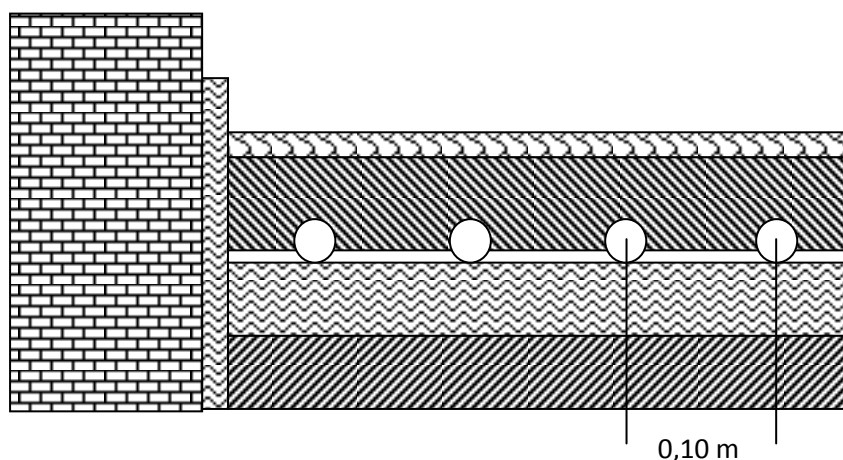


Figura 2.2. Composición del suelo.



Baldosa $e = 0,02 \text{ m}$

$$\lambda = 1,05 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$



Hormigón $e = 0,03 \text{ m}$

$$\lambda = 1,63 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$



Poliestireno Expandido $e = 0,02 \text{ m}$

$$\lambda = 0,033 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$



Hormigón $e = 0,02 \text{ m}$

$$\lambda = 1,63 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$



Plástico $e = 0,002 \text{ m}$

$$\lambda = 0,19 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

COMPOSICION	$e \text{ (m)}$	$\lambda \text{ (W/m}^\circ\text{C)}$	$\rho \text{ (Kg/m}^3\text{)}$	Perímetro	$A \text{ (m}^2\text{)}$
Hormigón Armado	0,02	1,63	2400	21,8	24,5496
Poliestireno Expandido	0,02	0,033	25		
Plástico	0,002	0,19	1200		
Hormigón	0,03	1,63	2400		
Baldosa	0,02	1,05	2000		

Tabla 2.5. Características de los materiales que componen el suelo.

La transmisión térmica del suelo, $U_s \text{ (W/m}^2\text{K)}$, se obtendrá en función del ancho D de la banda de aislamiento perimétrico, de la resistencia térmica del aislante, R_a , calculada mediante la expresión ($R_a = e/\lambda$) y la longitud característica B' de la solera.

B'	R _s	D = 0.5 m					D = 1.0 m					D ≥ 1.5 m				
		R _s (m² K/W)					R _s (m² K/W)					R _s (m² K/W)				
	0,00	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50
1	2,35	1,57	1,30	1,16	1,07	1,01	1,39	1,01	0,80	0,66	0,57	-	-	-	-	-
5	0,85	0,69	0,64	0,61	0,59	0,58	0,65	0,58	0,54	0,51	0,49	0,64	0,55	0,50	0,47	0,44
6	0,74	0,61	0,57	0,54	0,53	0,52	0,58	0,52	0,48	0,46	0,44	0,57	0,50	0,45	0,43	0,41
7	0,66	0,55	0,51	0,49	0,48	0,47	0,53	0,47	0,44	0,42	0,41	0,51	0,45	0,42	0,39	0,37
8	0,60	0,50	0,47	0,45	0,44	0,43	0,48	0,43	0,41	0,39	0,38	0,47	0,42	0,38	0,36	0,35
9	0,55	0,46	0,43	0,42	0,41	0,40	0,44	0,40	0,38	0,36	0,35	0,43	0,39	0,36	0,34	0,33
10	0,51	0,43	0,40	0,39	0,38	0,37	0,41	0,37	0,35	0,34	0,33	0,40	0,36	0,34	0,32	0,31
12	0,44	0,38	0,36	0,34	0,34	0,33	0,36	0,33	0,31	0,30	0,29	0,36	0,32	0,30	0,28	0,27
14	0,39	0,34	0,32	0,31	0,30	0,30	0,32	0,30	0,28	0,27	0,27	0,32	0,29	0,27	0,26	0,25
16	0,35	0,31	0,29	0,28	0,27	0,27	0,29	0,27	0,26	0,25	0,24	0,29	0,26	0,25	0,24	0,23
18	0,32	0,28	0,27	0,26	0,25	0,25	0,27	0,25	0,24	0,23	0,22	0,27	0,24	0,23	0,22	0,21
≥20	0,30	0,26	0,25	0,24	0,23	0,23	0,25	0,23	0,22	0,21	0,21	0,25	0,22	0,21	0,20	0,20

Tabla 2.6. Coeficiente global de transferencia de calor U_s para suelos en contacto con el terreno (W/m^2K).

Se define la longitud característica B' , según CTE, como el cociente entre la superficie del suelo, A , y la longitud de su semiperímetro, P , según la expresión (2.2):

$$B' = \frac{A}{0,5 * P} \quad (2.2)$$

$$B' = \frac{24,55}{0,5 * 21,8} = 2,25 \text{ m}$$

$$Ra = \frac{e}{\lambda} = 0,60 \frac{m^2 \text{ } ^\circ C}{W}$$

Ra , Resistencia del aislante ($m^2 \text{ } ^\circ C/W$)

Obtenemos el resultado mediante interpolación.

Para soleras con aislamiento continuo en toda su superficie se tomarán los valores de la columna $D \geq 1,5m$.

$$U_s = 0,62 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$$

• **Muros**

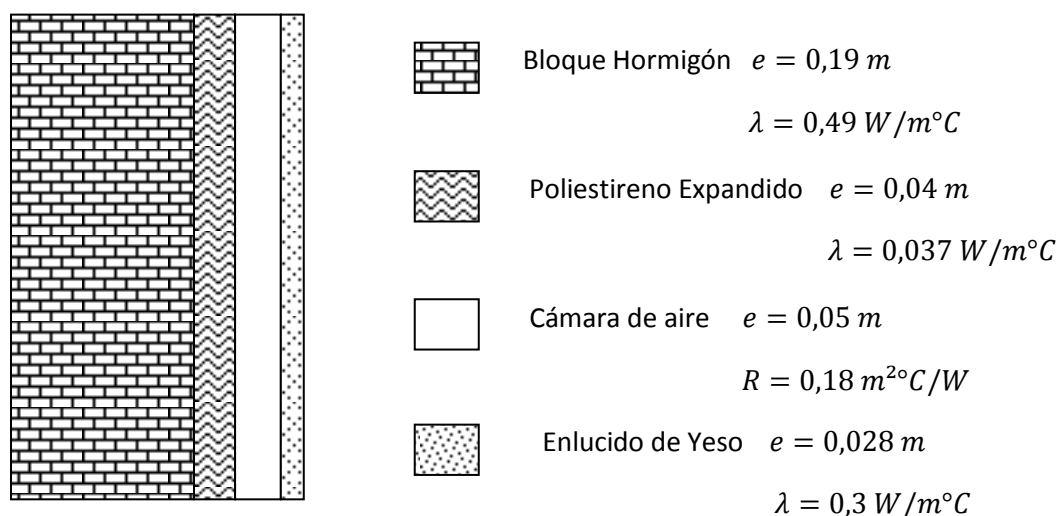


Figura 2.3. Composición de muros y techo.

COMPOSICION	$e \text{ (m)}$	$\lambda \text{ (W/m}^\circ\text{C)}$	$\rho \text{ (Kg/m}^3\text{)}$	$R \text{ (m}^2\text{C/W)}$
Bloque Hormigón	0,19	0,49	1200	
Poliestireno Expandido	0,04	0,037	15	
Cámara de Aire	0,05			0,18*
Enlucido de yeso	0,028	0,3	800	

Tabla 2.7. Características de los materiales que componen el muro exterior

*Resistencia térmica de cámaras de aire para cerramiento vertical sin ventilar según CTE, tabla 2.2.

$$U_M = \frac{1}{\sum \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_e} + \frac{1}{h_i}} = 0,52 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

Techo

COMPOSICION	$e \text{ (m)}$	$\lambda \text{ (W/m}^\circ\text{C)}$	$\rho \text{ (Kg/m}^3\text{)}$	$R \text{ (m}^2\text{C/W)}$
Bloque Hormigón	0,19	0,49	1200	
Poliestireno Expandido	0,04	0,037	15	
Cámara de Aire	0,05			0,18*
Enlucido de yeso	0,028	0,3	800	

Tabla 2.8. Características de los materiales que componen el techo

*Resistencia térmica de cámaras de aire para cerramiento vertical sin ventilar según CTE.

$$U_T = \frac{1}{\sum \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_e} + \frac{1}{h_i}} = 0,52 \frac{W}{m^2 K}$$

- **Ventanas**

Se dispone de tres ventanas de una superficie de 0,4 m² y consideramos que la superficie de la ventana ocupa todo el espacio.

COMPOSICION	e (m)	λ (W/m°C)	R (m²°C/W)
Vidrio	0,004	0,95	
Cámara de aire	0,005		
Vidrio	0,004	0,95	

Tabla 2.9. Características de las ventanas.

Según NBE-CT-79 sobre condiciones térmicas de los edificios, la transmisión térmica para ventanas dobles de 4cm con un espesor nominal de la cámara de aire de 6mm:

$$U_V = 3,3 \frac{W}{m^2 K}$$

- **Puertas**

Disponemos de una puerta de entrada con una superficie de 1,82 m².

COMPOSICION	e (m)	λ (W/m°C)	ρ (Kg/m³)
Contrachapado	0,005	0,14	
Poliestireno Expandido	0,03	0,037	15
Contrachapado	0,005	0,14	

Tabla 2.10. Composición de la puerta.

$$U_P = \frac{1}{\sum \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_e} + \frac{1}{h_i}} = 0,95 \frac{W}{m^2 K}$$

COMPROBACIÓN DE LOS LÍMITES DE TRANSMISIÓN TÉRMICA

Una vez calculados los coeficientes de transmisión térmica, comparamos éstos con los valores de las tablas 2.3 y 2.4.

Transmisión máxima de cerramientos		
Cerramientos	U (W/m²K)	U_{max} (W/m²K)
Muros	0,52	0,86
Suelos	0,62	0,64
Ventanas	3,3	3,50

Tabla 2.11. Comparación de la transmisión máxima en cerramientos

Observamos que cumple con todos los valores del Código Técnico de Edificación, evitando descompensaciones entre la calidad térmica de diferentes espacios.

Valores límites de los parámetros característicos medios		
Cerramientos	U (W/m²K)	U_{lim} (W/m²K)
Muros	0,52	0,66
Suelos	0,62	0,49
Huecos	3,3	3,50

Tabla 2.12. Comparación de los valores límites.

Según CTE, la demanda energética será inferior a la correspondiente a un edificio en el que los parámetros característicos de los cerramientos y particiones interiores que componen su envolvente térmica, sean los valores, U_{lim} , que aparecen en la tabla 2.11. Como se observa, el suelo supera el valor límite, esto es debido a que se trata de un suelo radiante y lo que se busca es transmitir la máxima cantidad de calor hacia el habitáculo a calentar, de ahí que supere el valor límite para la zona D3.

2.4 COEFICIENTE GLOBAL DEL EDIFICIO K_G

Este coeficiente nos indica de forma resumida la potencialidad del edificio a perder energía en invierno. Es función del factor de forma f del edificio, de la zona climática y del tipo de energía empleada en la calefacción.

Según NBE-CT-79, el coeficiente de transmisión térmica global K_G de un edificio no será superior a los valores señalados en la tabla 2.13 en función de la zonificación climática, el factor de forma y el tipo de energía, en nuestro caso utilizamos una bomba de calor.

Tipo de energía para calefacción	Factor de forma f (m^{-1})	Zona climática según Mapa 1 (art. 13.º)				
		A	B	C	D	E
Caso I Combustibles sólidos, líquidos o gaseosos	$\leq 0,25$	2,10 (2,45)	1,61 (1,88)	1,40 (1,61)	1,26 (1,47)	1,19 (1,40)
	$\geq 1,00$	1,20 (1,40)	0,92 (1,08)	0,80 (0,92)	0,72 (0,84)	0,68 (0,80)
Caso II Edificios sin calefacción o calefactados con energía eléctrica directa por efecto Joule	$\leq 0,25$	2,10 (2,45)	1,40 (1,61)	1,05 (1,19)	0,91 (1,05)	0,77 (0,91)
	$\geq 1,00$	1,20 (1,40)	0,80 (0,92)	0,60 (0,68)	0,52 (0,60)	0,45 (0,52)

Valor límite máximo de K_G en $\text{kcal/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ($\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$)

Tabla 2.13 Valor límite máximo de K_G

Debemos hallar el factor de forma f del edificio según el NBE-CT-79:

$$f = \frac{ST}{V} = \frac{114,6}{73,65} = 1,55 \text{ m}^{-1}$$

Donde:

ST , Superficie total a climatizar del edificio

V , Volumen del edificio

De la tabla 2.13 para el Caso II, factor de forma mayor que uno y zona D, nos da un valor de:

$$K_{G,lim} = 0,60 \text{ W/m}^2\text{ } ^\circ\text{C}$$

Hallado el valor límite de K_G calculamos el coeficiente real global del edificio que deberá ser inferior al valor máximo. El coeficiente real global K_G se define como la media ponderada de los coeficientes de transmisión de calor de los distintos elementos de separación del edificio con el entorno, según la expresión (2.3):

$$K_G = \frac{\Sigma K_E A_E + 0,5 \Sigma K_N A_N + 0,8 \Sigma K_Q A_Q + 0,5 \Sigma K_S A_S}{\Sigma A_E + \Sigma A_N + \Sigma A_Q + \Sigma A_S} \quad (2.3)$$

Donde:

K_E , Coeficiente global de transmisión de calor de los cerramientos en contacto con el ambiente exterior.

K_N , Coeficiente global de transmisión de calor de los cerramientos en contacto con otros edificios o locales no calefactados.

K_Q , Coeficiente global de transmisión de calor de los cerramientos de techo o cubierta.

K_S , Coeficiente global de transmisión de calor de los cerramientos de separación con el terreno.

	ΣKA
Muro	32,48
Suelo	15,22
Techo	14,37

Tabla 2.14. Resultado del producto del coeficiente global de transmisión de calor por el área de cada cerramiento.

Entonces:

$$K_G = \frac{32,48 + 0,8 \cdot 14,37 + 0,5 \cdot 15,22}{114,6} = 0,45 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Y cumple:

$$K_G \leq K_{G \text{ lim}}$$

Lo que supone un buen nivel de aislamiento en el edificio y menores pérdidas de calor. Si tuviera un valor por encima del máximo permitido, sería necesario emplear mejores técnicas de aislamientos con el fin de reducir K_G , para asegurar el buen comportamiento del edificio.

2.5 CARGAS TERMICAS DE CALEFACCIÓN

La carga térmica es el fenómeno que tiende a modificar la temperatura y la humedad en el local. El objetivo de este cálculo es determinar la potencia máxima de calefacción que ha de ser aportada para mantener constante la temperatura en el local.

Las cargas térmicas de calefacción se dividen en cargas exteriores e interiores siendo:

Cargas exteriores:

- Cargas de transmisión a través de las paredes, techos, suelos y superficies acristaladas
- Cargas de ventilación
- Carga por infiltración

Cargas interiores:

- Equipos
- Instalación
- Ocupantes

La obtención de la carga térmica total vendrá dada por:

$$Q_{\text{Termica Total}} = Q_{\text{Transmision}} + Q_{\text{Ventilacion}} + Q_{\text{Infiltraciones}} - Q_{\text{Interiores}}$$

Debemos tener en cuenta que el sistema de calefacción no funciona de forma permanente. El periodo de tiempo entre las 18:00 horas y las 8:00 horas del día siguiente no está conectado, lo que provoca que el local se enfríe y el calor perdido por muros, techo y suelo deba ser aportado por el sistema de calefacción cuando éste se conecte al día siguiente.

En este proyecto realizaremos una simulación en régimen transitorio en el que calcularemos el calor transmitido por el suelo durante el periodo de desconexión y su influencia en la demanda de calefacción al día siguiente.

2.5.1 CARGA DE TRANSMISIÓN

La carga térmica debido a la transmisión de calor a través de suelo, muros, techo y superficies acristaladas se calcula según la expresión (2.4):

$$Q = U \cdot A \cdot (T_i - T_e) \quad (2.4)$$

Donde:

U , Coeficiente global de transmisión térmica del cerramiento ($\text{W/m}^2\text{°C}$)

A , Superficie del cerramiento (m^2)

T_i , Temperatura interior (°C)

T_e , Temperatura exterior de cálculo (°C)

En la tabla 2.15 se recogen los datos de los cerramientos del local para calcular la carga térmica de transmisión de calor para una temperatura exterior de 6°C y una temperatura interior de confort de 21°C.

CARGAS TERMICAS	U (W/m²K)	A (m²)	ΔT	Q (W)	Qt (W)
SUELO	0,62	24,55	15	228,30	1016,2
MURO	0,52	9,54	15	74,55	
	0,52	22,36	15	174,4	
	0,52	20,94	15	163,3	
	0,52	9,54	15	74,55	
VENTANA	3,3	0,4	15	19,80	
	3,3	0,4	15	19,80	
	3,3	0,4	15	19,80	
PUERTA	0,95	1,82	15	25,95	
TECHO	0,52	27,65	15	215,7	

Tabla 2.15 Carga térmica de cada cerramiento y carga térmica total.

$$Q_{transmission} = 1016,2 \text{ W}$$

2.5.2 CARGA TÉRMICA DE VENTILACIÓN E INFILTRACIÓN

La ventilación es la renovación del aire interior del local con objeto de mantener unas condiciones sanitarias adecuadas dentro del local. La carga térmica de ventilación es, la perdida energética derivada de acondicionar térmicamente el aire entrante de acuerdo a la temperatura interior de diseño del local.

- Ventilación según la expresión (2.5):

$$Q_{ventilaci\ on} = nV_a\rho C_p(T_i - T_e) \quad (2.5)$$

Donde:

n , es el numero de renovaciones (ren/h), según norma UNE EN 12831 el número de renovaciones a utilizar dependerá de la ventilación con la dotemos al local, como mínimo deberemos emplear una renovación por hora (1ren/h)

V_a , es el volumen del local (73,65 m³)

ρ , densidad (1,2 Kg/m³)

C_p , Calor especifico de aire (1 KJ/Kg °C)

T_e , Temperatura exterior (°C)

T_i , Temperatura interior (°C)

En el que:

<i>n (Renovaciones/hora)</i>	1
<i>Va (Volumen del local)</i>	73,65
<i>ρC_p (KJ/m³°C)</i>	1,2
<i>(Ti-Te) °C</i>	15

Tabla 2.16. Datos para la carga de ventilación

El número de renovaciones por hora depende de la ventilación con la que se quiera dotar a la estancia, como mínimo, según la norma DB-HS referente a la calidad del aire interior, aplicamos una renovación por hora que, debido al reducido tamaño del local, es suficiente para garantizar una correcta condición de higiene y confort.

Por tanto:

$$Q_{ventilacion} = 370 \text{ W}$$

- Infiltraciones

Es necesario además, realizar el cálculo de infiltraciones a través de rendijas, de puertas y ventanas, según (2.6):

$$Q_{infiltracion} = V_{inf} \rho C_p (T_i - T_e) \quad (2.6)$$

Donde:

V_{inf} , Volumen infiltrado (m³/s)

ρ , densidad (Kg/m³)

C_p , Calor específico de aire (J/Kg °C)

T_e , Temperatura exterior (°C)

T_i , Temperatura interior (°C)

En el que, según DB HE1, la permeabilidad para la zona climática D será de 27 m³/hm².

$$V_{inf} = \frac{27}{3600} (A_{vent} + A_p) = 0,02 \text{ m}^3/\text{s}$$

Por tanto:

$$Q_{infiltracion} = 360 \text{ W}$$

La suma de ambas determina la carga térmica de ventilación total:

$$Q = 730 \text{ W}$$

2.5.3 CARGAS INTERNAS

Las cargas internas son las que aportan los equipos y las personas. Consideraremos la carga interna como una carga constante a lo largo del día.

- *Equipos*

Se dispondrán de cuatro ordenadores, un inversor y un regulador. Suponemos que éstos están conectados todo el día.

EQUIPOS	nº	$Q_{sen} (W)$	$Q (W)$	$Q_i (W)$
Ordenadores	4	250*	1000	1140
Inversor	1	100	100	
Regulador	1	40	40	

Tabla 2.17. Cargas internas por sistemas eléctricos.

*Según Manual de Climatización; Pinazo Ojer, Jose M.

- *Ocupación*

El local estará ocupado por tres personas. Estos aportan carga en función de la actividad física que están desarrollando. Esta carga es sensible y latente. Se multiplicarán por un coeficiente de simultaneidad, ya que las personas no están siempre en la vivienda.

OCUPACION				$Q (W)$
3 Personas	Q_{sen}	70 W*	0,75**	157,5
	Q_{lat}	60 W*	0,75**	135

Tabla 2.18. Cargas internas por ocupación.

*Valores típicos de la carga disipada por una persona en reposo.

**Factor de simultaneidad de las personas presentes en el local.

- Cargas internas totales:

$$Q_{intena} = 1140 + 157,5 + 135 = 1432,5 W$$

CARGA TERMICA TOTAL DE CALEFACCION

La carga total será la suma de todas las cargas calculadas:

$$Q_{Termica\ Total} = Q_{Transmision} + Q_{Ventilacion} + Q_{infiltracion} - Q_{internas}$$

Para cálculos posteriores no valoraremos en ciertas circunstancias las cargas internas para situarnos en el estado más desfavorable, así nos queda:

$$Q_{Termica\ Total} = 1746,2\ W$$

El resultado obtenido es la carga de calefacción en régimen permanente que utilizaremos para el cálculo y dimensionamiento de nuestro sistema de calefacción por suelo radiante.

3. MÉTODO DE CÁLCULO Y DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMAS DE SUELO RADIANTE (SEGÚN UNE EN 1264)

La norma UNE EN 1264 especifica los requisitos de diseño e instalaciones de los sistemas de calefacción y refrigeración por suelo radiante. Dicha norma, compuesta de 5 partes, señala los límites de emisión térmica, temperatura superficial del suelo y temperatura del agua que transporta las tuberías, normas de instalación y uso del sistema para un correcto funcionamiento.

De acuerdo con la norma calcularemos.

- Emisión térmica.
- Resistencias ascendentes y descendentes.
- Temperatura superficial del suelo, temperatura a nivel de los tubos.
- Pérdidas térmicas descendentes.
- Caudal de impulsión.
- Dimensionamiento y diseño.

Los cálculos para el dimensionamiento del suelo radiante se harán de acuerdo a la carga térmica de calefacción en régimen permanente calculado en el capítulo 2, despreciando las cargas internas.

Emisión Térmica

En el procedimiento de cálculo de la emisión térmica influyen abundantes variables como la carga térmica, el tipo de revestimiento, la temperatura ambiente y la del agua, el aislante térmico, etc. Así, la normativa simplifica el cálculo en función del tipo de sistema utilizado, en nuestro caso, sistema de calefacción por suelo, y se calcula según la ecuación 3.1, en función de la temperatura superficial del suelo, T_m y de la temperatura ambiente, T_i :

$$q = 8,92 * (T_m - T_i)^{1.1} (W/m^2) \quad (3.1)$$

Donde

q , Emisión térmica del suelo

T_m , temperatura media del suelo en zona ocupada (°C)

T_i , temperatura interior de la habitación (°C)

Para evitar problemas de diseño y confort, la norma establece el valor límite de la temperatura máxima superficial del suelo, en 29°C. Así, la emisión térmica límite, q_{lim} , para una temperatura interior de 20°C, es $100 W/m^2$, en régimen permanente.

Resistencias ascendentes y descendentes

Para poder calcular la potencia térmica total de un sistema de calefacción por suelo radiante, será necesario conocer la resistencia térmica del suelo en dirección ascendente y descendente. Como es evidente, el suelo radiante deberá poseer una alta conductividad ascendente, y una conductividad descendente lo mínima posible.

Según las ecuaciones que encontramos en la norma UNE EN 1264-3, y respecto a las resistencias indicadas en la figura 3.1, queda:

- Resistencia ascendente según (3.2):

$$R_o = \frac{1}{\alpha} + R_{\lambda;B} + \frac{S_u}{\lambda_u} \quad (3.2)$$

Donde:

$\frac{1}{\alpha}$, Resistencia de transferencia de calor en la superficie de suelo radiante ($\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$)

$R_{\lambda;B}$, Resistencia térmica de la baldosa ($\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$)

$\frac{S_u}{\lambda_u}$, Resistencia térmica del pavimento por encima del tubo ($\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$)

- Resistencia descendente según (3.3):

$$R_u = R_{\lambda,ins} + R_{\lambda,techo} + R_{\lambda,plaster} + R_{\alpha,techo} \quad (3.3)$$

Donde:

$R_{\lambda,ins}$, Resistencia térmica del aislamiento térmico ($\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$)

$R_{\lambda,techo}$, Resistencia térmica del material por debajo del aislante ($\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$)

$R_{\lambda,plaster}$ y $R_{\alpha,techo}$, Son despreciables debido a que el suelo está en contacto con el terreno.

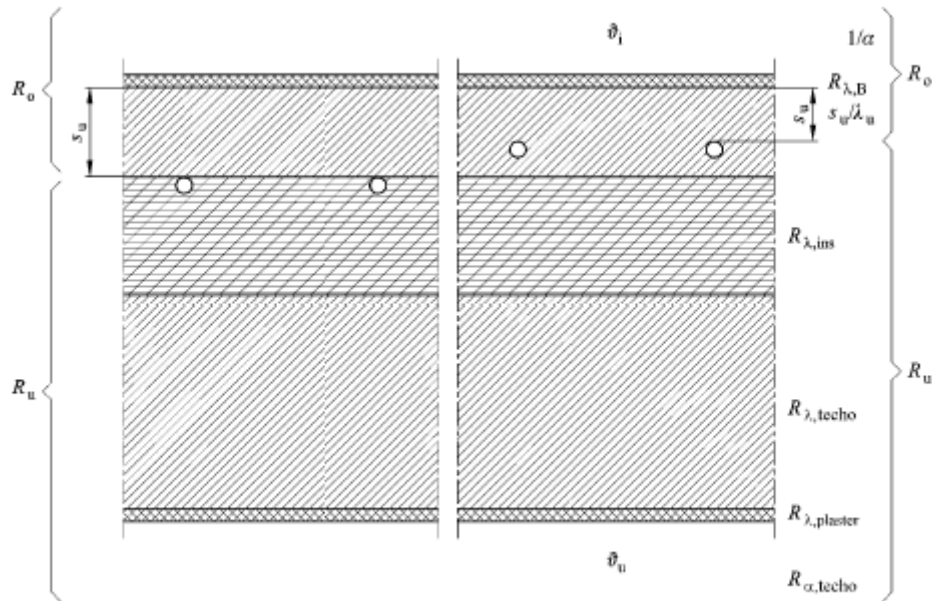


Figura 3.1. Composición de resistencias de un suelo con sistema radiante con dos configuraciones.

Calculo de temperaturas

-Desviación media logarítmica entre el medio caloportador y la estancia

La emisión térmica es proporcional a la desviación media logarítmica entre el medio caloportador y la estancia (UNE EN 1264-2). De la ecuación (3.4) obtenemos la diferencia de temperatura entre el agua de calefacción y la habitación, en la cual se tiene en cuenta el efecto del descenso de temperatura del agua de calefacción, quedando:

$$\Delta T_{aire-agua} = \frac{|T_{imp} - T_{ret}|}{Ln \left(\frac{|T_{amb} - T_{imp}|}{|T_{amb} - T_{ret}|} \right)} \quad (3.4)$$

Donde

T_{imp} , temperatura de impulsión del agua (°C). Para nuestro sistema utilizaremos una temperatura de impulsión de 40°C

T_{ret} , temperatura de retorno del agua (°C)

T_{amb} , temperatura ambiente de la habitación (°C)

A efectos de diseño del sistema radiante, la norma aconseja utilizar un salto térmico (diferencia entre la temperatura de impulsión y la de retorno) de 5°C.

-Temperatura superficial del suelo

Para el cálculo de la temperatura superficial del suelo se utiliza la curva característica básica (figura 3.2) que se encuentra en la norma UNE EN 1264-2 en función de la emisión térmica y la temperatura de confort:

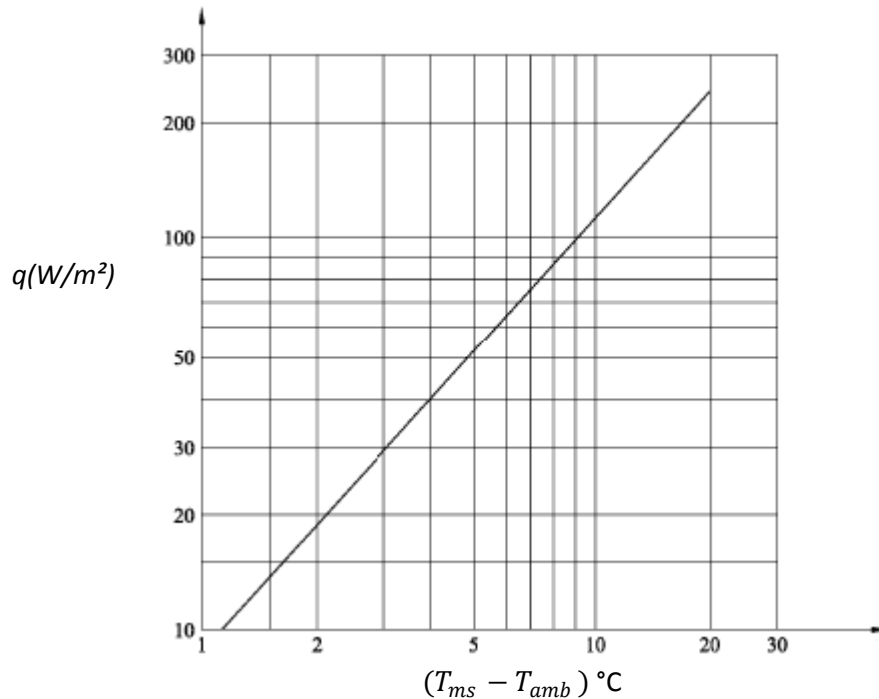


Figura 3.2. Curva característica básica

Pérdidas térmicas descendentes

Las pérdidas por flujo térmico descendente, según la figura 3.1, de los sistemas de suelo radiante a través de estancias que se encuentran debajo del sistema, se calculan de acuerdo con la norma según la ecuación (3.5):

$$q_d = \frac{1}{R_u} (R_o \cdot q + T_i - T_t) \quad (3.5)$$

Donde

q_d , emisión térmica del sistema de suelo radiante (W/m²)

R_u , resistencia a la transmisión térmica parcial descendente de la estructura del suelo

R_o , resistencia a la transmisión térmica parcial ascendente de la estructura del suelo

T_i , Temperatura media del ambiente interior (°C)

T_t , Temperatura media del terreno bajo el suelo radiante (°C)

Potencia térmica total específica

La potencia térmica total del suelo radiante será la suma de las pérdidas térmicas descendentes más la emisión térmica del suelo, quedando:

$$q_T = q + q_d \quad (\text{W/m}^2) \quad (3.6)$$

Donde:

q_T , Potencia térmica total (W/m²)

q , Emisión térmica (W/m²)

q_d , Pérdidas térmicas descendentes (W/m²)

Caudal de impulsión

La potencia térmica total de un sistema de calefacción por suelo radiante está compuesta por una emisión térmica específica q y una pérdida térmica hacia abajo q_d . Teniendo en cuenta éstas circunstancias, el caudal del diseño de flujo de agua de un circuito de calefacción se calcula según (3.7) de acuerdo con la norma UNE EN 1264:

$$m_H = \frac{A \cdot q}{\sigma \cdot C_W} \cdot \left(1 + \frac{R_o}{R_u} + \frac{T_a - T_t}{q \cdot R_u} \right) \quad (\text{l/s}) \quad (3.7)$$

Donde:

σ , es el salto térmico de temperaturas entre la ida y el retorno (5°C)

C_W , el calor específico del agua 4190 J/KgK

A , Área del suelo (m²)

q , emisión térmica (W/m²)

R_o , Resistencia térmica por encima de los tubos (m² °C/W)

R_u , Resistencia térmica por debajo de los tubos (m² °C/W)

T_a , Temperatura ambiente interior (°C)

T_t , Temperatura del terreno (°C)

Dimensionamiento y diseño

Para el dimensionamiento y diseño del sistema de suelo radiante se puede hacer uso de un manual técnico de cualquier empresa especializada, en nuestro caso, hacemos uso del Manual Técnico Uponor.

4. SUELO RADIANTE

En este capítulo realizaremos una breve introducción donde explicaremos el funcionamiento de un suelo radiante y los criterios de diseño y dimensionamiento para obtener el máximo rendimiento.

Haciendo uso de la norma UNE EN 1264 y en régimen estacionario, calcularemos los valores que determinan la temperatura superficial del suelo, emisión térmica del suelo radiante y pérdidas térmicas.

Obtendremos la temperatura media a lo largo del punto medio del circuito y perfil de temperatura de éste, haciendo uso de las normas UNE EN 12241 y UNE EN 15377 con las que determinaremos la temperatura media a lo largo del punto medio de las tuberías y temperatura media entre las tuberías a lo largo del punto medio del circuito respectivamente.

4.1 CRITERIOS DE DISEÑO DE UN SUELO RADIANTE

El principio básico de funcionamiento del sistema consiste en la impulsión de agua a una temperatura de unos 40°C (*Manual técnico Uponor*) a través de circuitos de tuberías situadas bajo el pavimento del local o habitación a calefactar.

Según el sistema tradicional de calefacción por suelo radiante las tuberías se incrustan en una capa de mortero. Este, situado sobre las tuberías y bajo el pavimento, absorbe la energía térmica disipada por las tuberías y la cede al pavimento que, a su vez, emite esta energía por convección al ambiente interior.

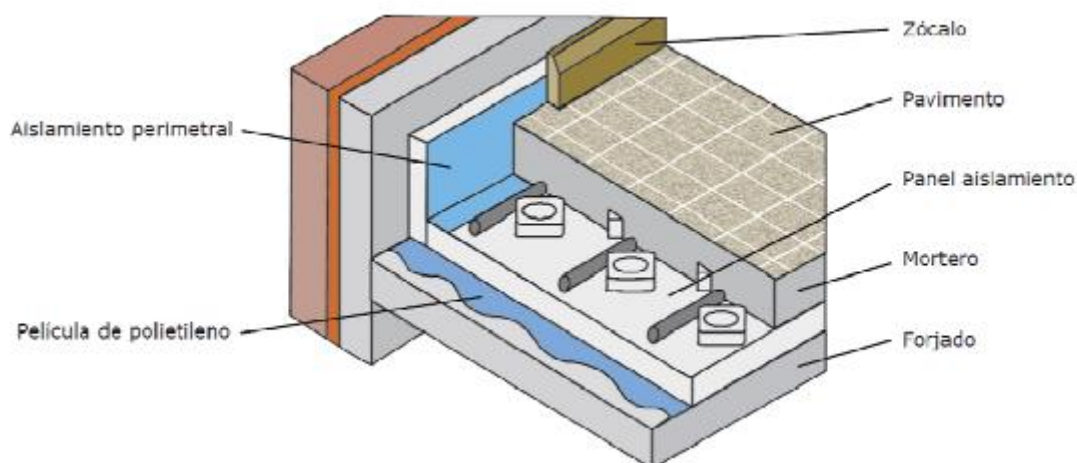


Figura 4.1. Configuración suelo radiante.

Para conseguir un rendimiento térmico óptimo, es necesario prestar atención a diversos aspectos en la fase de construcción. La estructura de un suelo radiante funciona con la premisa de inercia térmica. El calentamiento de un sistema de suelo radiante, implica elevar la temperatura de una losa con elevado calor específico capaz de almacenar gran cantidad de energía. Esta energía no se entrega de forma instantánea, por lo que el espesor y la calidad del mortero, es importante.

La norma UNE-EN 1264-4, especifica los requisitos para el diseño y la construcción de sistemas de estructuras de suelo calentado con agua caliente para asegurar que el sistema de calefacción bajo el suelo sea adecuado.

Los datos a partir de los cuales se definirán los criterios de diseño y cálculo del sistema son:

- Tipo de suelo. De sus características térmicas dependerá la temperatura necesaria en la distribución
- Temperatura ambiente. Siguiendo los valores recomendados en la norma UNE-EN 1264. La temperatura ambiente afecta a la temperatura superficial del pavimento y a la temperatura del agua en los tubos.
- Temperatura exterior de proyecto. Siguiendo los valores marcados en el RITE.
- Coeficientes de transmisión de calor de los cerramientos.
- Salto térmico en el circuito hidráulico. El salto térmico entre la ida y el retorno de los tubos, según la norma UNE-EN 1264 debe estar comprendido entre 0 °C y 5 °C.
- Diámetro exterior del tubo emisor. Los diámetros más utilizados son 16 mm y 20 mm.

Para la distribución de temperaturas homogéneas existen diferentes formas de diseñar los circuitos de circulación, de forma que se optimice el aporte de calor al sistema en función de las dimensiones de la habitación. Estos son los utilizados (*Uponor; Manual Técnico*):

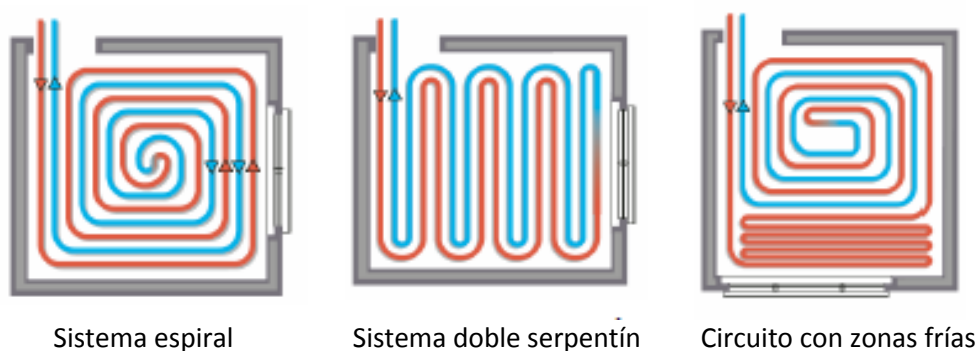


Figura 4.2. Configuraciones de las tuberías.

De entre todos los sistemas existentes de calefacción, el suelo radiante es el que mejor se ajusta al perfil óptimo de temperaturas del cuerpo humano. Este perfil es aquél según el cual la temperatura del aire a la altura de los pies es ligeramente superior a la temperatura del aire a la altura de la cabeza. Esto se traduce en una percepción de una mayor sensación de confort. A continuación se muestra un esquema de la distribución vertical de temperaturas en función del sistema de calefacción:

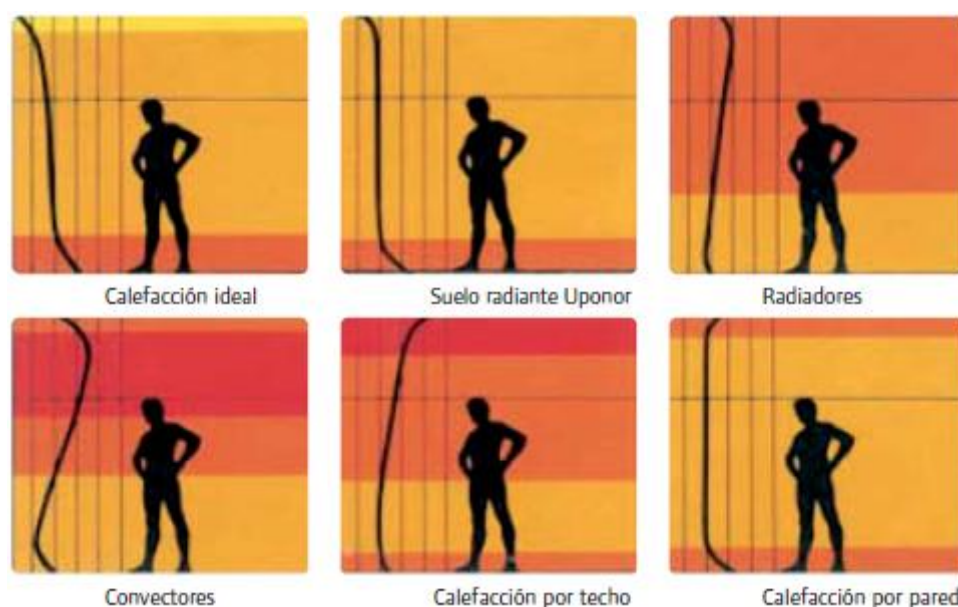


Figura 4.3. Distribución de temperaturas en función del sistema de calefacción.

El emisor térmico es todo el suelo del recinto a climatizar. Esto da lugar a que la emisión térmica sea uniforme en toda la superficie. Este fenómeno se contrapone al de "zonas calientes" y "zonas frías" que se obtiene con otros sistemas de calefacción en los cuales existe un número limitado de emisores de calor.

La velocidad de migración de las capas de aire caliente hacia las zonas frías es proporcional a la diferencia de temperaturas del aire entre ambas zonas, caliente y fría. Como la temperatura de la superficie emisora (pavimento) de un sistema de calefacción por suelo radiante es baja, esa diferencia de temperaturas del aire es muy reducida lo que origina que el movimiento de aire debido al sistema de calefacción sea imperceptible. Una ausencia de movimiento de aire produce menor movimiento de polvo y un entorno más higiénico y saludable; haciendo al suelo radiante un sistema de calefacción muy aconsejable para personas alérgicas o con problemas respiratorios.

Una de las principales características del suelo radiante es el ahorro energético. Para una misma sensación térmica percibida por el usuario, la temperatura ambiente de un local es inferior si dicho local se calienta por suelo radiante a si se hace mediante otro sistema (radiadores, convectores de aire, etc.).

Al calentar mediante otros sistemas, la temperatura de las zonas elevadas del local es mayor (temperatura no sentida por el usuario), de lo que resulta que para la misma sensación térmica sentida la temperatura ambiente interior en un sistema de calefacción por suelo radiante es comparativamente menor.

Al ser menor la temperatura ambiente interior también son menores las pérdidas energéticas (pérdidas por cerramientos, por ventilación y por infiltración) ya que éstas son proporcionales a la diferencia de temperaturas entre el exterior del local y el interior

4.2 DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DEL SUELO RADIANTE

- **Dimensionamiento y disposición de los circuitos**

La configuración que utilizaremos en nuestro sistema de suelo radiante es el de doble serpentin. La distribución del tubo empieza por un extremo del local y termina en el extremo opuesto avanzando en líneas paralelas equidistantes una de otras pero dejando huecos donde van colocadas las tuberías de retorno hasta llegar otra vez al punto de partida.

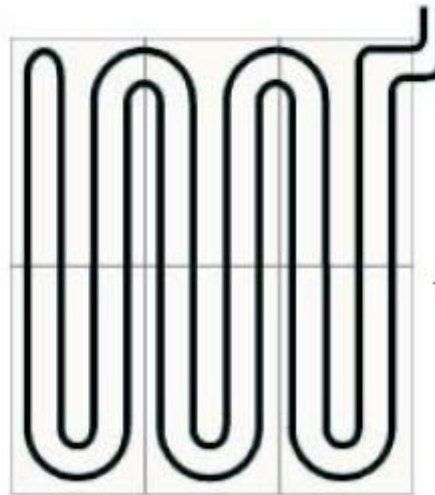


Figura 4.4. Configuración doble serpentin.

La longitud de los circuitos se determina por:

$$L = \frac{A}{d}$$

Donde:

A, Superficie del local a climatizar, (m²)

d, Distancia entre tubos, (m)

En nuestro caso utilizamos tuberías de 0,02 m x 0,016 m, con una distancia entre tubos (d) de 0,10 m.

- **Dimensionamiento del suelo radiante**

Conocido el caudal utilizado para nuestro sistema, 0,22 l/s, procederemos al cálculo de los circuitos. Utilizaremos dos circuitos, con un área ocupada por cada uno de 12m². En la tabla 4.1 se exponen las características de los circuitos:

Circuitos	A(m ²)	T _{imp} (°C)	Paso d(m)	Caudal (l/s)	L (m)
C1	12	40	0,1	0,11	120
C2	12	40	0,1	0,11	120

Tabla 4.1. Características de los circuitos

La longitud máxima de los circuitos viene determinada por:

- La longitud de los rollos utilizados
- La potencia de la bomba de la instalación.

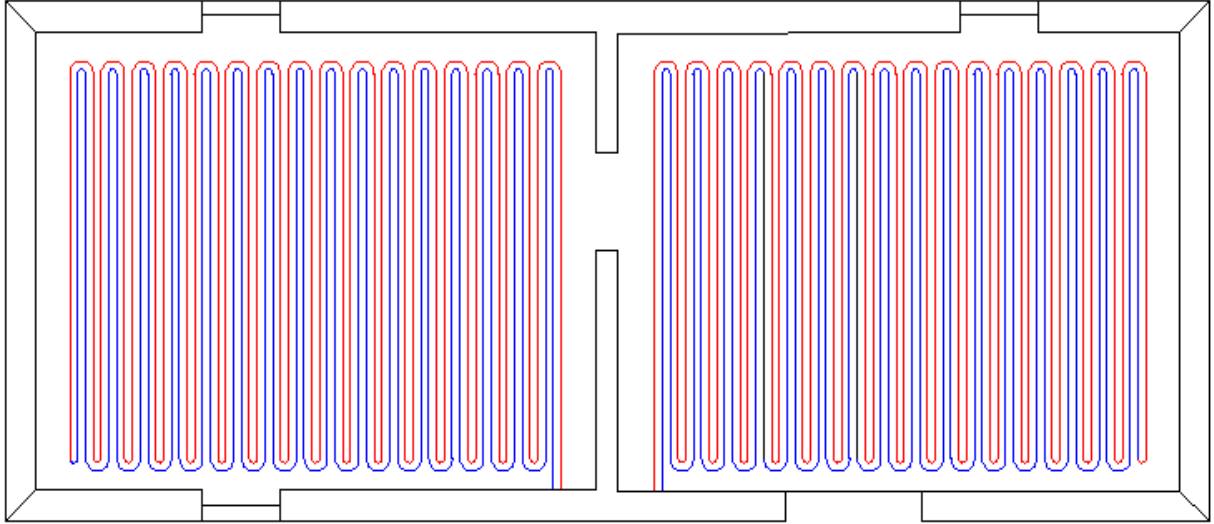


Figura 4.5. Disposición de los circuitos.

- **Temperatura media de la superficie del suelo**

Para el cálculo de la temperatura media de la superficie del suelo utilizaremos la curva característica (figura 4.6) que se encuentra en la norma UNE EN 1264 en función de la emisión térmica q :

$$q = \frac{Q}{\text{Area}} = \frac{1746,2}{24} = 72,8 \text{ W/m}^2$$

Q , Carga térmica total (W)

Área, Superficie que ocupan los circuitos (m^2)

La temperatura interior, T_{amb} :

$$T_{amb} = 20 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (} T^a \text{ a utilizar segun norma UNE EN 1264)}$$

La temperatura superficial máxima admisible según la norma es de 29°C .

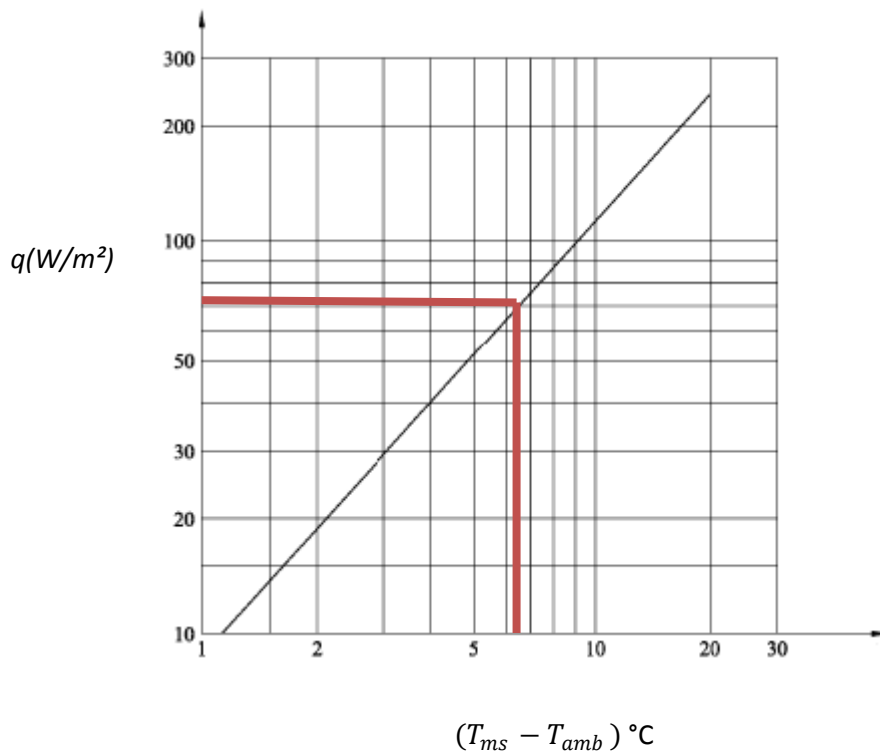


Figura 4.6. Curva característica básica.

De la figura obtenemos una diferencia de unos 6,5°C, con lo que obtenemos una temperatura media superficial del suelo de alrededor 26,5°C.

Otro método para la obtención de la temperatura superficial del suelo sería el descrito por *De Andres y Rodriguez –Pomatta, J.A (Calefacción y Agua Caliente Sanitaria, 1991)* en el que obtiene esta temperatura en función de la temperatura máxima admisible, 29°C, y el paso de los tubos, $d = 10 \text{ cm}$. Así nos queda (4.1) y (4.2):

$$T_m = T \cdot [1 - d \cdot (1,8 - d)] \quad (4.1)$$

$$T_M = T \cdot [1 - 0,55 \cdot d \cdot (1,8 - d)] \quad (4.2)$$

Tomando la temperatura máxima de la superficie, $T_M = 29^\circ\text{C}$ obtenemos $T = 32^\circ\text{C}$ en (4.2) e introduciendo T en (4.1) obtenemos la temperatura media de la superficie del suelo, $T_m = 26,56^\circ\text{C}$.

Comparando los resultados obtenidos, las temperaturas son muy aproximadas, con lo que la temperatura media de la superficie del suelo será:

$$\boxed{T_{ms} = 26,5^\circ\text{C}}$$

- **Emisión térmica**

En cumplimiento con la norma UNE EN 1264- 2, para una temperatura máxima del pavimento de 29°C y una temperatura ambiente de 20°C, la potencia máxima de diseño será según (4.3):

$$q_{max} = 8,92 * (29 - 20)^{1.1} = 100 \text{ W/m}^2 \quad (4.3)$$

En nuestro caso, para una temperatura media superficial de 26,5°C queda:

$$q = 8,92 * (26,5 - 20)^{1.1} = 70 \text{ W/m}^2 \quad (4.4)$$

Observamos que cumple la condición. Para toda la superficie del suelo la emisión térmica es **1680 W**.

- **Resistencias y coeficientes de transmisión de calor del suelo.**

Para el cálculo del caudal, temperaturas a nivel de los tubos y pérdidas térmicas ascendente y descendente, será necesario conocer la resistencia térmica del suelo en las direcciones ascendentes y descendentes, tomando como referencia el plano de los tubos. Como es evidente, el suelo radiante se ve beneficiado por una alta conductividad ascendente, y una conductividad descendente lo mínima posible, en las tablas 4.2 y 4.3 detallamos los materiales en ambas direcciones.

Dirección descendente	e (m)	λ (W/m°C)	R_u
PVC	0,004	0,17	0,02
Plástico	0,002	0,19	0,01
Poliestireno Exp.	0,05	0,033	1,52
Hormigón Armado	0,02	1,63	0,01

Tabla 4.2. Materiales en dirección descendente.

$$R_u = \sum \frac{e}{\lambda} = 0,64 \text{ m}^2\text{C/W}$$

$$U_u = \frac{1}{R_u} = 1,56 \text{ W/m}^2\text{C}$$

Donde:

R_u, Resistencia térmica por debajo de los tubos (m²C/W)

U_u, Coeficiente parcial de transmisión de calor descendente (W/m²C)

Dirección ascendente	e (m)	λ (W/m°C)	R_o
Hormigón Armado	0,03	1,63	0,02
Baldosa	0,02	1,05	0,02
PVC	0,004	0,17	0,02
1/α			0,0926

Tabla 4.3. Materiales en dirección ascendente.

$$R_o = \sum \frac{e}{\lambda} = 0,15 \text{ m}^2\text{C/W}$$

$$U_o = \frac{1}{R_u} = 6,70 \text{ W/m}^2\text{C}$$

Donde:

R_o , Resistencia térmica por encima de los tubos (m²C/W)

U_o , Coeficiente parcial de transmisión de calor ascendente (W/m²C)

1/α, resistencia de transferencia de calor en la superficie del suelo radiante según norma UNE EN 1264.

- Determinación de la temperatura del terreno

Para el cálculo de la temperatura del terreno a una profundidad z , utilizamos la ecuación 4.6 que se encuentra en la *Guía Técnica del Ahorro y Eficiencia Energética en Climatización* para el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).

Suponiendo un terreno homogéneo con propiedades térmicas constantes, una temperatura constante del suelo del local en contacto con el terreno y para un día de funcionamiento en régimen estacionario, nos queda la ecuación (4.6):

$$T_t = T_{cs} - A_z \cdot e^{-z \sqrt{\frac{\pi}{365 \cdot \alpha}}} \quad (4.6)$$

Donde:

T_t , Temperatura del terreno (°C)

T_{cs} , Temperatura del suelo en contacto con el terreno (°C)

A_z , Oscilación de la temperatura superficial (°C)

α , Difusividad térmica del suelo (m²/día)

z , Profundidad (m)

Calcularemos la temperatura a unos 0,1 m. de profundidad, ya que, según la *Guía Técnica*, la temperatura del terreno con la profundidad se mantiene más constante que en la superficie. Haciendo uso de las figuras expuestas a continuación, que representan la evolución de la temperatura en la superficie del terreno (figura 4.7 derecha) y la temperatura en función de la profundidad del terreno (figura 4.7 izquierda) para diferentes días a lo largo del año. La curva roja corresponde a la distribución de temperaturas en el día 30 (finales de enero), las curvas magenta, azul y amarillo, respectivamente, a los días 90, 180 y 270. Observando la curva roja, que representa al 30 de enero, la temperatura a 0,1 m de profundidad apenas varia, con lo que la ecuación 4.6 queda de la forma:

$$T_t = T_{cs}$$

Otra forma para determinar la temperatura del suelo es utilizar, únicamente, las graficas de diseño (curvas de embudo), como la mostrada en la figura 4.7 (izquierda).

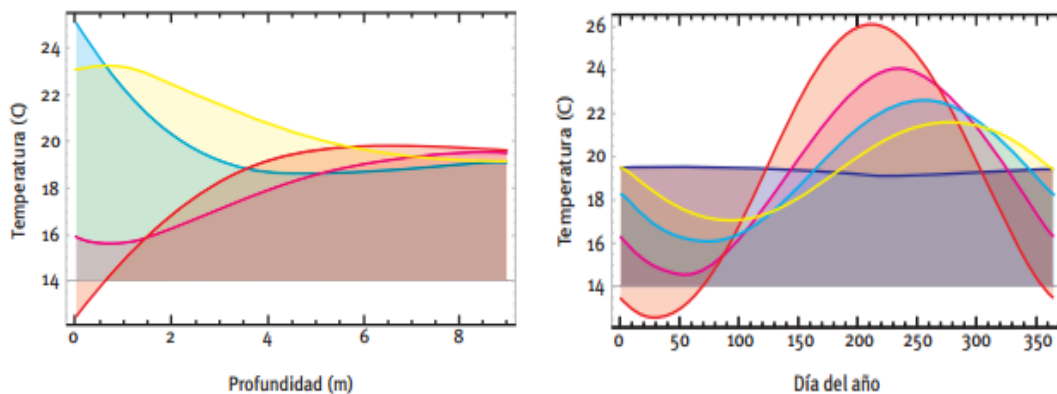


Figura 4.7. Evolución de la temperatura del terreno con la profundidad (Izq.) y en la superficie (der). *Guía Técnica del Ahorro y Eficiencia Energética en Climatización*.

En nuestro caso, para conocer la temperatura del terreno en contacto con el suelo debemos conocer las pérdidas térmicas descendentes que se producen en el suelo y, haciendo uso de las ecuaciones de transferencia de calor, hallaremos la temperatura a la que se encuentra el suelo en contacto con el terreno. Así nos queda:

- Pérdidas térmicas descendentes según UNE EN 1264.

Las pérdidas térmicas descendentes a través del suelo se calculan según la ecuación (4.7) de acuerdo con la norma:

$$q_d = \frac{1}{R_u} (R_o \cdot q + T_i - T_t) \quad (4.7)$$

Donde

q , emisión térmica del sistema de suelo radiante (70 W/m²)

R_u , resistencia a la transmisión térmica parcial por debajo de los tubos (m²°C/W)

R_o , resistencia a la transmisión térmica parcial por encima de los tubos (m²°C/W)

T_i , Temperatura ambiente interior (21°C)

T_s , Temperatura del terreno bajo el suelo radiante (6°C según normativa. A efectos de cálculo, se mantendrá constante durante el proceso de encendido del sistema por primera vez, aunque esto no sea así, ya que sufrirá un calentamiento hasta alcanzar el equilibrio con el suelo)

Sustituyendo los datos en (4.7) nos queda:

$$q_d = \frac{1}{0,64} (0,15 \cdot 70 + 21 - 6) = 17,4 \text{ W/m}^2$$

Para toda la superficie queda: $Q_d = 427 \text{ W}$.

Utilizando la ecuación (4.8) en dirección descendente, podemos obtener la temperatura a la que se encuentra el suelo en contacto con el terreno:

$$Q_d = U_u \cdot A \cdot (T_{tub} - T_t) \quad (4.8)$$

Donde:

Q_d , Calor total descendente (W)

U_u , Coeficiente parcial de transmisión de calor descendente (W/m²°C)

T_{tub} , Temperatura a nivel del de los tubos. Para este cálculo consideraremos inicialmente una temperatura de 37,5°C, media entre la temperatura de impulsión que utilizamos, 40°C, y la de retorno 35°C y que aplicamos un incremento de temperatura de 5°C de acuerdo con la norma.

$$\boxed{T_t = 26,3 \text{ °C}}$$

Sustituyendo T_t en la ecuación 4.7, obtenemos unas pérdidas térmicas descendentes de 195 W, en régimen permanente.

- **Diferencia de temperatura entre el agua de calefacción y el interior**

Según la norma UNE EN 1264-3 la diferencia de temperatura entre el agua de calefacción y la habitación se calcula según la ecuación (4.9):

$$\Delta T_{\text{aire-agua}} = \frac{|T_{\text{imp}} - T_{\text{ret}}|}{\ln \left(\frac{|T_{\text{amb}} - T_{\text{imp}}|}{|T_{\text{amb}} - T_{\text{ret}}|} \right)} \quad (4.9)$$

Donde:

T_{imp} , son 40°C (Temperatura utilizada para nuestro sistema)

T_{ret} , son 35°C (Aplicando un incremento de temperatura de 5°C de acuerdo con la norma UNE EN 12241)

T_{amb} , son 21°C

$$\Delta T_{aire-agua} = \frac{|40 - 35|}{Ln\left(\frac{|21-40|}{|21-35|}\right)} = \frac{5}{0,305} = 16,5^{\circ}\text{C}$$

La temperatura media del fluido T_{mf} se obtiene de acuerdo con la norma UNE EN 1264:

$$\Delta T_{aire-agua} = T_{mf} - T_{amb}$$

La temperatura media del agua en las tuberías queda:

$$T_{mf} = \Delta T_{aire-agua} + T_{amb}$$

$$T_{mf} = 16,5 + 21 = 37,5^{\circ}\text{C}$$

- **Potencia térmica del suelo radiante**

La potencia térmica del suelo radiante en régimen permanente será la suma de la emisión térmica más las pérdidas térmicas descendentes, quedando:

$$Q_T = 1680 + 195 = 1875 \text{ W}$$

- **Caudal**

Según la norma UNE EN ISO 1264 el caudal necesario para cubrir la demanda se calcula mediante la expresión (4.10):

$$m_H = \frac{A \cdot q}{\sigma \cdot C_{ag}} \cdot \left(1 + \frac{R_o}{R_u} + \frac{T_a - T_t}{q \cdot R_u}\right) \quad (4.10)$$

Donde:

σ , es el salto térmico de temperaturas entre la ida y el retorno (5°C)

C_{ag} , el calor específico del agua 4190 J/KgK

A , Área del suelo (m^2)

q , Emisión térmica (W/m^2)

R_o , Resistencia térmica parcial por encima de los tubos ($\text{m}^2\text{C/W}$)

R_u , Resistencia térmica parcial por debajo de los tubos ($\text{m}^2\text{C/W}$)

T_a , Temperatura ambiente interior ($^{\circ}\text{C}$)

T_t , Temperatura del terreno ($^{\circ}\text{C}$)

$$m_H = 0,22 \frac{l}{s}$$

- **Calculo pérdida de carga en las tuberías.**

Para el cálculo de las pérdidas de carga se han de obtener tanto las perdidas lineales (primarias, longitud de los conductos), como las secundarias (codos, válvulas, etc.). Para el cálculo de las pérdidas lineales utilizamos la formula de Darcy-Weisbach (4.11):

$$h = f \cdot \frac{L \cdot v^2}{Dh \cdot 2g} = \frac{8 \cdot f \cdot L}{g \cdot \pi^2 \cdot Dh^5} \cdot Q^2 \quad (4.11)$$

Para el cálculo de las pérdidas secundarias debidos a los accesorios (4.12):

$$h = K \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (4.12)$$

Donde

K es el coeficiente de resistencia de los accesorios (codos, válvulas, etc.).

$$v^2 = \frac{16Q^2}{\pi^2 \cdot D^4}$$

$Dh = D$, por ser una tubería circular

g, la gravedad

Q, el caudal (m³/s)

El factor de fricción f , es función del número de Reynolds que representa la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas en la tubería. Cuando las fuerzas viscosas son predominantes (Re con valores bajos), el fluido discurre de forma laminar por la tubería. Cuando las fuerzas de inercia predominan sobre las viscosas (Re con valores elevados), el fluido deja de moverse de una forma ordenada (laminar) y pasa a régimen turbulento, cuyo estudio en forma exacta es prácticamente imposible. Cuando el régimen es laminar, la importancia de la rugosidad es menor, respecto a las pérdidas debidas al propio comportamiento viscoso del fluido, que cuando es régimen turbulento, donde, por el contrario, la influencia de la rugosidad se hace más patente.

Así el factor de fricción es función de $f = (Re, \frac{\epsilon}{D})$

Calculo de f :

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu}$$

Donde:

$\rho = 10^3 \text{ Kg/m}^3$

$v = 0,35 \text{ m/s}$

$$\mu = 10^{-3} \text{ Kg/ms}$$

$$D = 0,02 \text{ m}$$

$$Re = 7000 > 2500 \text{ (Flujo turbulento)}$$

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,007}{20} = 0,00035$$

Con lo que si entramos en el diagrama de Moody $f=0,038$

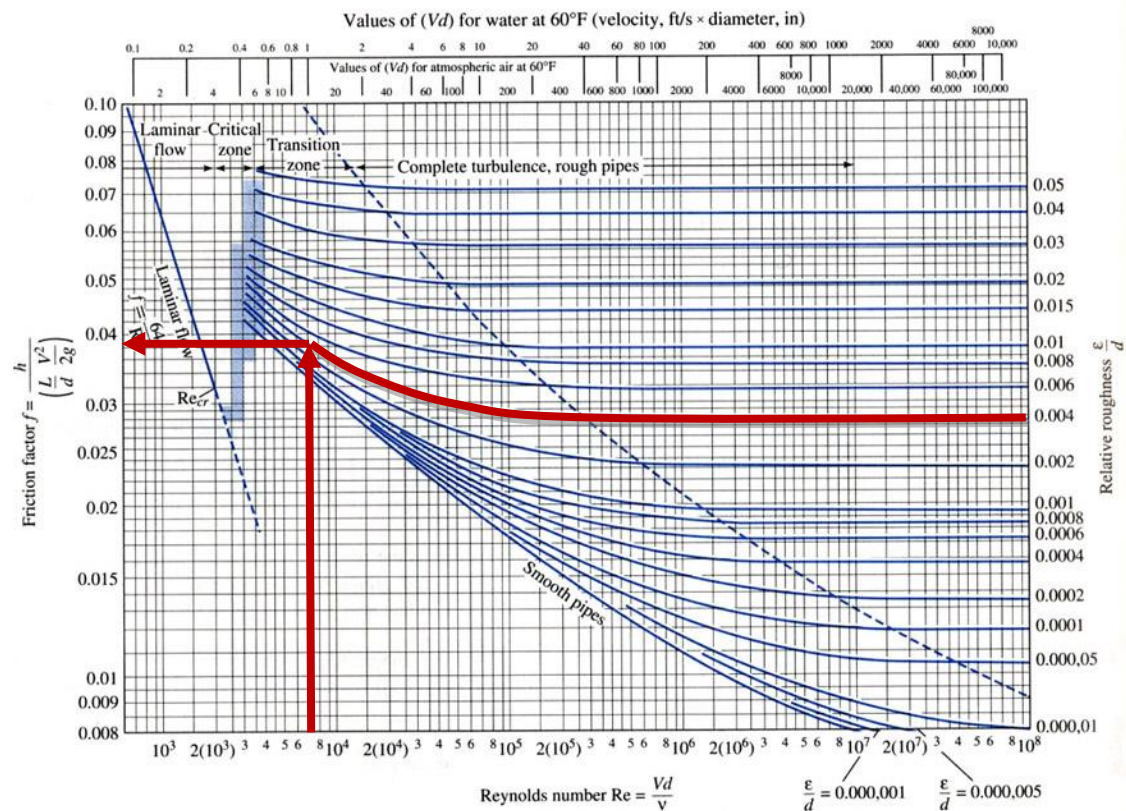


Figura 4.8. Diagrama de Moody

Para las pérdidas secundarias estimamos un K de 0,40 (*Mecánica de Fluidos, Antonio Crespo*) para los codos de 180° suave con un diámetro de 0,02 m. Para un total de 32 codos en cada circuito, dando un ΣK de 12,8.

Con esto nos queda:

$$H = 1,5 \text{ m. c. a (14,8 Kpa)}$$

Para el cálculo de las pérdidas de carga en los colectores, conocidos el caudal total del local y el número de circuitos, utilizamos la siguiente figura (*Manual Técnico Uponor*):

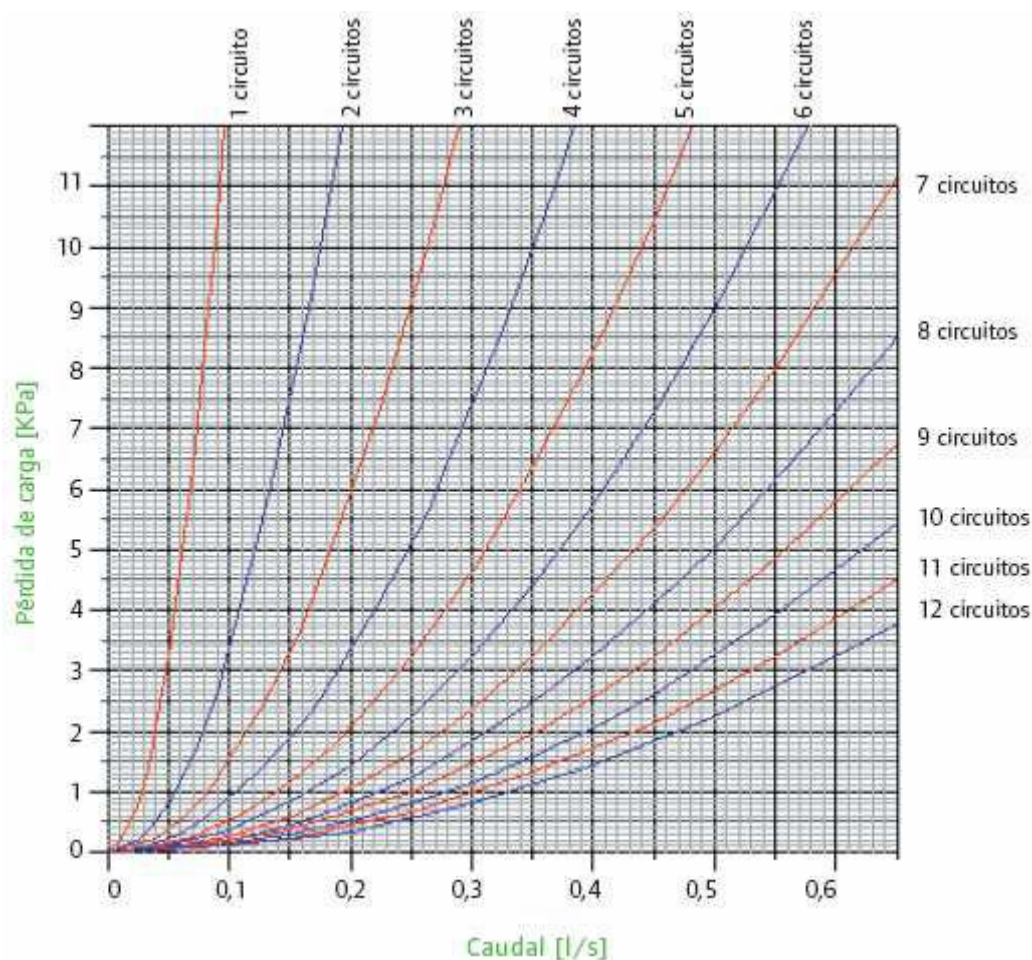


Figura 4.9. Pérdida de presión en los circuitos.

Observamos que las pérdidas de carga en colector con dos circuitos y caudal de 0,22 l/s, está alrededor de 12 KPa.

La pérdida total para todo el sistema de tuberías será:

$$\Delta P = 14,8 \cdot 2 (\text{circuitos}) + 12 = 32,5 \cdot 1,1 = 45,76 \text{ KPa}$$

Aplicamos un 10% a las pérdidas de carga para considerar otros accesorios como válvulas, manguitos, etc. y la pérdida de carga que se produce en la tubería de distribución.

- **Selección de la bomba**

La pérdida de carga de la bomba se puede encontrar entrando en el gráfico de curvas características y seleccionando la velocidad que quede por encima del punto característico de funcionamiento de la instalación, que viene determinado por el caudal y la pérdida de carga. (Manual Técnico Uponor).

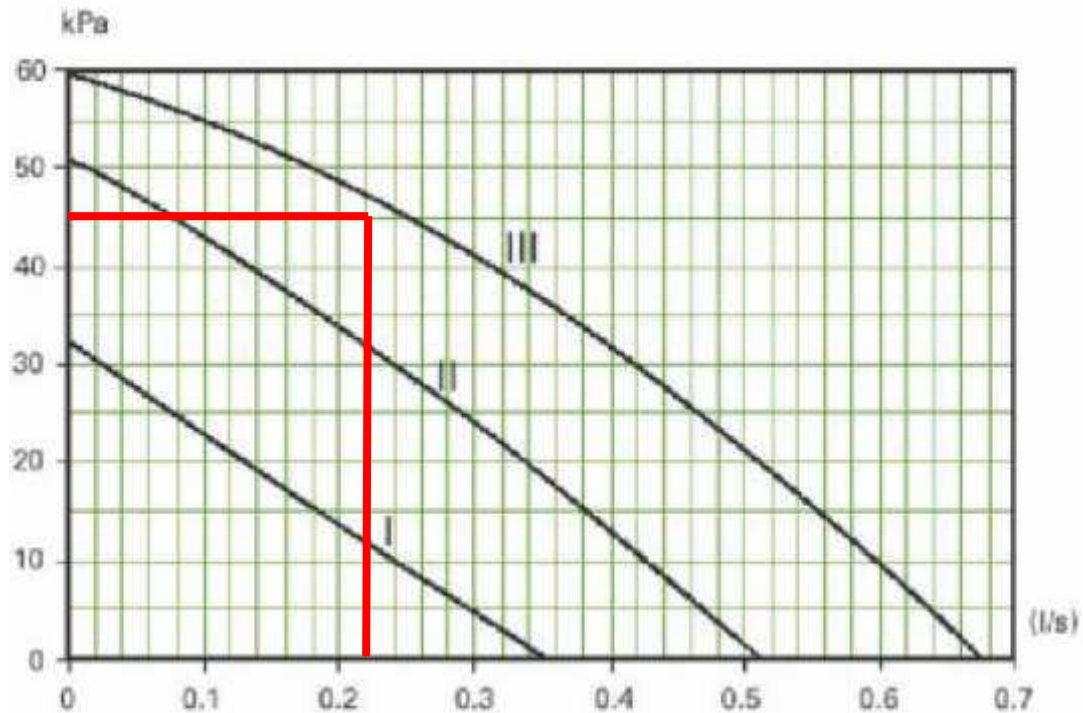


Figura 4.10. Punto característico de funcionamiento de la instalación (bomba 22A UPONOR).

Conocido el caudal total y la pérdida de carga, se calcula la potencia necesaria de la bomba impulsora según (4.13):

$$P(W) = C \cdot \Delta P \quad (4.13)$$

C=Caudal ($2,2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$)

ΔP =Pérdida de carga ($45,76 \cdot 10^3 \text{ N/m}^2$)

Nos queda:

$$P = 10 \text{ W}$$

Y la pérdida de carga según punto de funcionamiento (kPa vs l/s, Tipo III, figura 4.10) será de 47 KPa.

4.3 VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA DEL SUELO

En todas las definiciones de suelo radiante, podemos leer que es un sistema en el que la temperatura superficial del suelo, y la emisión térmica de éste, son homogéneas en toda su superficie, pero como veremos en este apartado, no es así.

La configuración escogida (doble serpentín) provoca que la temperatura del agua disminuya a lo largo del circuito, además, la separación que existe entre tuberías, denominada paso, provoca una caída de temperatura entre ellas. Esto hace que la temperatura en la superficie del suelo no sea la misma en todas las zonas.

En la figura 4.11 podemos observar, a modo de ejemplo, el perfil de temperaturas en un suelo con sistema radiante y configuración de doble serpentín.

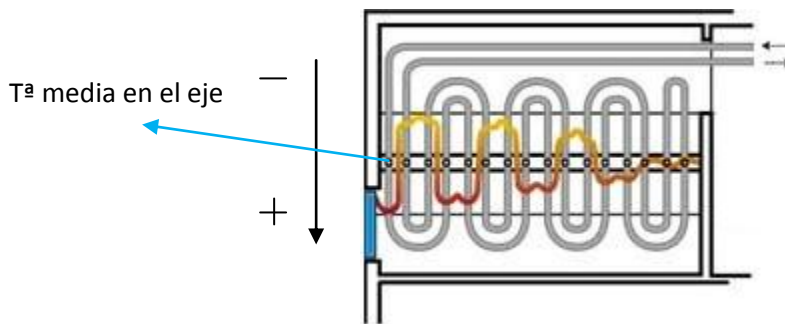


Figura 4.11. Perfil de temperatura en un suelo radiante de doble serpentín. (Manual técnico Uponor)

Se observa como la temperatura no es uniforme en toda la superficie. Tomando como referencia el punto medio de cada tramo de tubería (tramo de tubería, figura 4.12), podemos observar la variación de temperatura que se produce a lo largo del circuito y con ello en la superficie del suelo. Además, como se observa en la figura, la separación entre tuberías provoca una caída de temperatura entre ellas.

En los apartados 4.3.1 y 4.3.2 calcularemos, en régimen estacionario, la distribución de temperaturas en el suelo, calculando el incremento de temperatura en cada tramo y la temperatura entre las tuberías.

4.3.1 VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA EN UN TRAMO DE TUBERÍA

La diferencia entre la temperatura de impulsión y la de retorno, implica, que a lo largo de cada tramo de tubería, la temperatura del fluido disminuya. Por tanto, la temperatura y emisión que se desprende en cada tramo no será constante en toda la superficie del suelo.



Figura 4.12. Tramo del circuito de tuberías.

Para el cálculo de la variación de temperatura en cada tramo, utilizaremos el método descrito en la norma **UNE-EN ISO 12241** para tuberías sin aislamiento enterradas, en función del caudal (el caudal utilizado en cada circuito es de 0,11 l/s), capacidad calorífica del agua y flujo de calor. El cálculo de este último, al estar enterrada la tubería, dependerá de la temperatura, resistencia y conductividad térmica del suelo, profundidad de la tubería y temperatura media del fluido.

Para obtener el valor exacto de la variación de temperatura de un tramo del circuito, se aplican las ecuaciones (4.14) y (4.15) que se encuentran en la norma UNE EN 12241:

$$|T_f - T_a| = |T_i - T_a| \cdot e^{-\alpha \cdot l} \quad (4.14)$$

Donde:

$$\alpha = \frac{U_{T,1} \cdot 3,6}{\dot{m} \cdot C_p} \quad (4.15)$$

T_f , Temperatura final del fluido (°C)

T_i , Temperatura inicial del fluido (°C)

T_a , Temperatura ambiente (°C)

C_p , Capacidad calorífica del agua (4,1 KJ/KgK)

\dot{m} , Flujo de masa del fluido (kg/h)

l , Longitud de la tubería (m)

$U_{T,1}$, Transmisión térmica lineal total (W/mK)

Como en la práctica la variación de temperatura es pequeña, para un cálculo aproximado, utilizaremos, según la norma, la ecuación (4.16):

$$\Delta T = \frac{q_l \cdot 3,6}{\dot{m} \cdot C_p} \quad (4.16)$$

En nuestro caso, al tratarse de un sistema de suelo radiante, las tuberías se encuentran enterradas en el suelo del local, lo que provoca una variación de temperaturas distinta que si se encontraran descubiertas. Por ello, el flujo de calor lineal para una tubería enterrada, q_l , es según UNE EN 12241, la ecuación 4.17

$$q_l = \frac{T_{mf} - T_s}{R_l + R_E} \cdot l \quad (W/m) \quad (4.17)$$

Donde:

T_{mf} , Temperatura media del fluido calculado en el punto 4.2 de acuerdo con la norma (°C)

T_s , Temperatura superficial del suelo (°C)

R_E , Resistencia térmica lineal del suelo (ecuación 4.18)

R_l , Resistencia térmica lineal de la tubería (ecuación 4.20)

l , Longitud de la tubería (m)

La resistencia térmica lineal del suelo, R_E , para una tubería sin aislamiento, se calcula usando la ecuación (4.18) (UNE EN 12241):

$$R_E = \frac{1}{2\pi\lambda_E} \operatorname{arcosh} \frac{2H_E}{D_i} \quad (m^\circ C/W) \quad (4.18)$$

Donde:

λ_E , conductividad térmica del material que rodea la tubería. (W/m °C)

H_E , distancia entre el centro de la tubería y la superficie del suelo (m)

D_i , Diámetro interior de la tubería (m)

Que, para $H_E/D_i > 2$, puede simplificarse a la ecuación (4.19):

$$R_E = \frac{1}{2\pi\lambda_E} \ln \frac{4H_E}{D_i} \quad (m^\circ C/W) \quad (4.19)$$

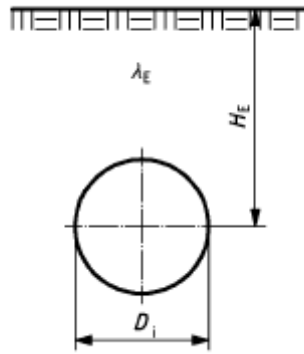


Figura 4.13. Tubería enterrada sin aislamiento.

La resistencia térmica lineal, R_l , de una tubería de una sola capa es (4.20) (UNE EN 12241):

$$R_l = \frac{\ln \frac{D_e}{D_i}}{2\pi\lambda} \quad (m^{\circ}C/W) \quad (4.20)$$

Donde:

D_e , Diámetro exterior de la tubería (0,02 m)

D_i , Diámetro interior de la tubería (0,016 m)

λ , Conductividad térmica de la tubería según NBE-CT.79 (0,17 W/m °C)

H_E , distancia entre el centro de la tubería y la superficie del suelo (0,06 m)

Aplicando las ecuaciones descritas en la norma a nuestra instalación, nos queda:

Sustituyendo en la ecuación (4.17):

$$q_l = \frac{T_{mf} - T_s}{R_l + R_E} \cdot l$$

Donde

$T_{mf} = 37,5^{\circ}C$ (Temperatura media del fluido calculada de acuerdo con la norma UNE EN 1264)

$T_s = 26,5^{\circ}C$ (Temperatura superficial del suelo calculada en apartado 4.2)

Resistencia térmica lineal del suelo, R_E , de acuerdo con la norma, para la condición $H_E/D_i = 0,06/0,016 = 3,75 > 2$:

$$R_E = \frac{1}{2\pi\lambda_E} \ln \frac{4H_E}{D_i} \quad (m^{\circ}C/W)$$

Donde:

$\lambda_E = 1,63 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$, conductividad térmica del hormigón según NBE-CT-79

$$R_E = \frac{1}{2\pi \cdot 1,63} \ln \frac{4 \cdot 0,06}{0,016} = 0,26 \text{ m}^\circ\text{C/W}$$

Resistencia térmica lineal de la tubería según (4.20):

$$R_l = \frac{\ln \frac{D_e}{D_i}}{2\pi\lambda}$$

Donde:

$$D_e = 0,02 \text{ m}$$

$$D_i = 0,016 \text{ m}$$

$\lambda = 0,17 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ (Conductividad térmica de la tubería según NBE-CT-79)

$$R_l = \frac{\ln \frac{0,02}{0,016}}{2\pi \cdot 0,17} = 0,20 \text{ m}^\circ\text{C/W}$$

Introduciendo los datos calculados en (4.17), nos queda:

$$q_l = \frac{37,5 - 26,5}{0,20 + 0,26} = 24 \text{ W/m}$$

Y sustituyendo en la ecuación (4.16) obtenemos el incremento de temperatura:

$$\Delta T = \frac{q_l \cdot 3,6}{\dot{m} \cdot C_p}$$

Donde:

$$q_l = 24 \text{ W/m}$$

$$\dot{m} = 0,11 \text{ l/s (400 Kg/h)}$$

$$C_p = 4,18 \text{ KJ/Kg } ^\circ\text{C}$$

$$\boxed{\Delta T = 0,051 \text{ } ^\circ\text{C/m}}$$

La ecuación (4.16) solo da resultados con precisión suficiente para tuberías relativamente cortas, y una variación de temperaturas relativamente pequeña, como es nuestro caso, además, debe cumplir con la condición que se encuentra en la norma:

$$\Delta T \leq 0,06 \cdot (T_{impulsion} - T_{interior})$$

$$0,051 \leq 0,06 \cdot (40 - 20)$$

$$0,051 \leq 1,2$$

Comprobamos que cumple la condición.

Con estos datos podemos determinar la temperatura del fluido en cada tramo de tubería del circuito. Así, para una longitud de tramo de 3 m, se produce un incremento máximo de temperatura de $0,15^{\circ}\text{C}$. Considerando una longitud del tramo de impulsión de 60 m, se produce un incremento máximo de temperatura de 3°C . Debemos señalar que el incremento calculado se ha realizado para una temperatura media del fluido del circuito completo, con lo que es un incremento medio por tramo.

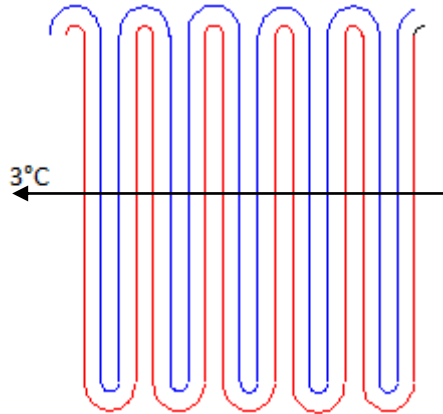


Figura 4.14. Incremento máximo de temperatura en suelo

En cumplimiento de la norma **UNE EN 1264**, para la determinación de los valores de diseño de la emisión térmica y la diferencia de temperatura entre el agua de calefacción y la habitación, consideraremos un descenso de temperatura en el agua calentada de 5°C . Para nuestro sistema utilizamos una temperatura de impulsión de 40°C con lo que la temperatura de retorno será de 35°C .

4.3.2 VARIACIÓN DE TEMPERATURA ENTRE LAS TUBERIAS.

La disposición de las tuberías en los sistemas de suelo radiante, hacen que tengan que estar separadas una distancia d , denominada paso, que en nuestro caso, con la configuración de doble serpentín, es de 10 cm, con la que se intenta conseguir una temperatura homogénea en la superficie del suelo. En la realidad, esta separación provoca una disminución de la temperatura entre las tuberías, como observamos anteriormente en la figura 4.11.

En este apartado calcularemos la temperatura media entre las tuberías a lo largo del punto medio del circuito.

Para el cálculo de la temperatura media entre tuberías utilizamos la norma **UNE EN 15377-1** (Diseño de sistemas empotrados de calefacción y refrigeración por agua) anexo B. Esta norma desarrolla un método de cálculo básico utilizando resistencias térmicas “lineales”. De esta forma se destacan los parámetros importantes para la transmisión de calor. Calcularemos, en función del calor ascendente (4.23) y descendente (4.24) y la resistencia térmica total del circuito, R_t de acuerdo con la norma, la temperatura media entre las tuberías a lo largo del punto medio del eje del circuito en régimen estacionario.

Para ello, de acuerdo con la norma, se calcula inicialmente la resistencia, R_t , producida por la influencia del tipo de tubo (diámetro, espesor de la pared, material), del paso entre tubos, del caudal de agua y de la resistencia de la capa conductora, así nos queda (4.21):

$$R_t = R_z + R_w + R_r + R_x \quad (4.21)$$

La definición de cada resistencia según la norma es:

R_t , es la resistencia térmica total del circuito definida en la figura 4.15 y 4.16;

R_z , es la resistencia definida en la figura 4.15

R_w , es la resistencia entre el fluido y la pared del tubo;

R_r , es la resistencia de la pared del tubo;

R_x , es la resistencia entre la pared exterior del tubo y la capa conductora;

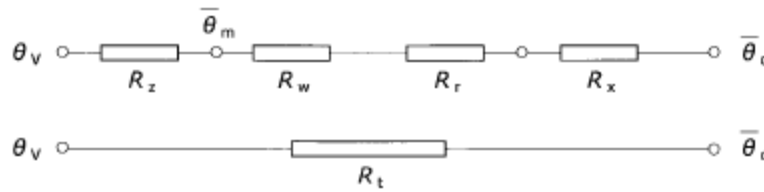


Figura 4.15. Red general de resistencias del suelo.

En condiciones de régimen estacionario, R_t se determina según la norma mediante (4.22):

$$R_t = \frac{1}{m_{H,sp} \cdot c \left[1 - \exp \left(- \frac{1}{(R_w + R_r + R_x + \frac{1}{U_1 + U_2}) \cdot m_{H,sp} \cdot c} \right) \right]} - \frac{1}{U_1 + U_2} \quad (4.22)$$

Donde:

$m_{H,sp}$, es el flujo másico de calefacción específico de diseño (0,11 Kg/s);

c , es la capacidad calorífica del agua (4,18 KJ/Kg K);

U_i , es el coeficiente parcial de transmisión de calor en dirección ascendente y descendente ($U_1 = 6,70 \text{ W/m}^2\text{°C}$, $U_2 = 1,56 \text{ W/m}^2\text{°C}$ Calculados en el punto 4.2).

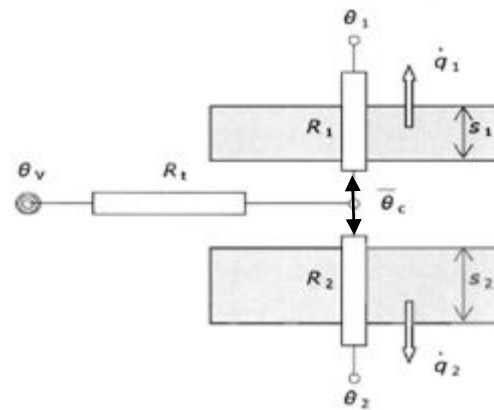


Figura 4.16. Red de resistencias del suelo.

El flujo calorífico en régimen de equilibrio ascendente (4.23) y descendente (4.24) de acuerdo con la norma:

$$q_1 = \frac{1}{R_1 R_2 + R_1 R_t + R_2 R_t} [R_t (\theta_2 - \theta_1) + R_2 (\theta_v - \theta_1)] \quad (W/m^2) \quad (4.23)$$

$$q_2 = \frac{1}{R_1 R_2 + R_1 R_t + R_2 R_t} [R_t (\theta_1 - \theta_2) + R_1 (\theta_v - \theta_2)] \quad (W/m^2) \quad (4.24)$$

Dónde:

θ_v , es la temperatura de impulsión del agua (40°C);

θ_1 , es la temperatura del local (21°C)

θ_2 , temperatura del terreno en condiciones de equilibrio (26,3°C Calculado en el punto 4.2)

R_1 , resistencia ascendente por encima de los tubos (0,15 m²°C/W Calculado en el punto 4.2)

R_2 , resistencia descendente por debajo de los tubos (0,64 m²°C/W Calculado en el punto 4.2)

El cálculo de la temperatura media se determina según la configuración de tubos empotrados, figura 4.17, de acuerdo con la norma UNE EN 15377.

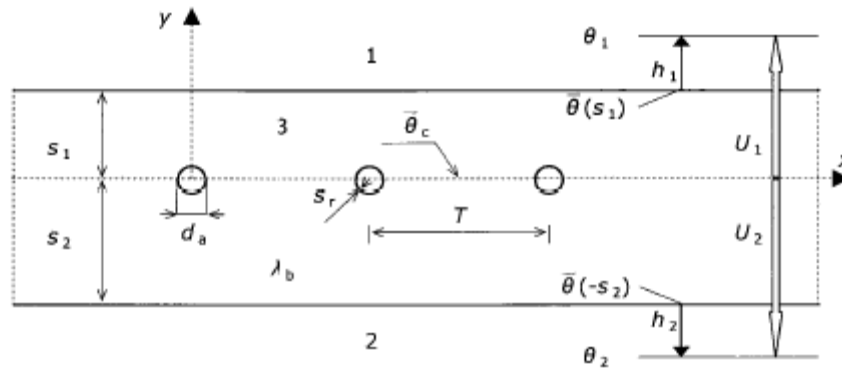


Figura 4.17. Configuración tubos empotrados.

Donde:

T , es el paso entre tubos (0,1m);

d_a , es el diámetro exterior del tubo (0,02m);

s_r , es el espesor de la pared del tubo (0,004m);

s_1 , es el espesor de la capa conductora por encima del plano de los tubos (0,05m);

s_2 , es el espesor de la capa conductora por debajo del plano del tubo (0,04m);

h_1 , es el coeficiente de transmisión de calor con el local (0,10 m²°C/W);

h_2 , es el coeficiente de transmisión de calor con el terreno (despreciable según NBE-CT-79)

λ_b , conductividad del hormigón (1,63 W/m °C);

λ_r , conductividad del tubo (0,17 W/m °C).

l , longitud de un circuito (m)

Cálculo de las resistencias que componen R_t

$-R_w$:

Según la norma, para flujos turbulentos ($Re > 2300$), R_w se calcula según (4.25); en nuestro caso, $Re = 7000$ (Calculado en el punto 4.2):

$$R_w = \frac{T^{0,13}}{8 \cdot \pi} \left(\frac{d_a - 2 \cdot s_r}{\dot{m}_{H,Sp} \cdot l} \right)^{0,87} \quad (4.25)$$

$$R_w = 0,00148 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

$-R_r$:

La resistencia de la pared del tubo R_r según (4.26);

$$R_r = \frac{T \cdot \ln\left(\frac{d_a}{d_a - 2 \cdot s_r}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_t} \quad (4.26)$$

$$R_r = 0,023 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

$-R_x$:

Y la resistencia R_x entre la pared exterior del tubo y la capa conductora según (4.27) para $s_1/T > 0,3$ ($0,05/0,1=0,5 > 0,3$) y $s_2/T > 0,3$ ($0,04/0,1=0,4 > 0,3$);

$$R_x = \frac{T \cdot \ln\left(\frac{T}{\pi d_a}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_b} \quad (4.27)$$

$$R_x = -0,0011 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Sustituyendo estos datos en la ecuación (4.21), R_t queda:

$$R_t = 0,024 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Conocido el valor de R_t podemos conocer las pérdidas térmica específica ascendente y descendente aplicando las ecuaciones (4.23) y (4.24) respectivamente.

$$q_1 = \frac{1}{0,096 + 0,0036 + 0,015} \cdot [0,024(26,3 - 21) + 0,64(40 - 21)] = 107,5 \text{ W/m}^2$$

$$q_2 = \frac{1}{0,096 + 0,0036 + 0,015} \cdot [0,024(21 - 26,3) + 0,15(40 - 26,3)] = 19 \text{ W/m}^2$$

Para la toda la superficie del suelo nos queda:

-Dirección ascendente:

$$q_1 = 2640 \text{ W}$$

-Dirección descendente:

$$q_2 = 414 \text{ W}$$

Una vez conocida la pérdida térmica ascendente y descendente (q_1, q_2) y utilizando la ecuación de transferencia de calor en el suelo en ambas direcciones, podemos obtener la temperatura media entre las tuberías, $\bar{\theta}_c$ (Ver figuras 4.16 y 4.17), de acuerdo con la norma:

$$q_1 = A \cdot U_1 \cdot (\bar{\theta}_{c1} - 21)$$

$$q_2 = A \cdot U_2 \cdot (\bar{\theta}_{c2} - 26,3)$$

Donde 21°C, es la temperatura del interior y 26,3°C, la temperatura del terreno en estado estacionario calculado en el punto 4.2, U_1 y U_2 son los coeficientes parciales de transmisión de calor en dirección ascendente y descendente.

Despejando $\bar{\theta}_c$ de cada ecuación obtenemos la temperatura media a lo largo del punto medio entre las tuberías del circuito, quedando:

$$\bar{\theta}_{c1} = \frac{2640 + 3402}{162} = 37,2^\circ\text{C}$$

$$\bar{\theta}_{c2} = \frac{414 + 1007,2}{38,2} = 37,2^\circ\text{C}$$

La temperatura media entre las tuberías a lo largo del punto medio del eje del circuito, en régimen permanente, es **37,2°C**. Como es lógico, ésta temperatura no será la misma al inicio del tramo de impulsión del agua que al final, la norma nos ofrece un método para obtener la temperatura media entre las tuberías a lo largo del punto medio del circuito en toda la superficie.

4.4 RESULTADOS

Obtenido el incremento de temperaturas por tramo y la temperatura media entre las tuberías a lo largo del punto medio del circuito de acuerdo con la norma, podemos obtener el perfil de temperaturas en el plano de los tubos y conocer el valor de las pérdidas térmicas totales ascendentes y descendentes que se producen en el suelo con el sistema en funcionamiento y en régimen estacionario.

- **Evolución de la temperatura en el plano a nivel de los tubos**

Debido a que la temperatura a lo largo del punto medio del circuito varía en función de la temperatura de cada tramo, y la longitud de cada uno es de 3 metros, el incremento de temperatura que sufrirá cada tramo será según la aplicación de la norma:

$$\Delta T_{tramo} = 3 \cdot 0,051 = 0,15 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Nuestra instalación consta de un total de 20 tramos lo que nos da un descenso total de temperatura de:

$$\Delta T_{total} = 20 \cdot 0,15 = 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

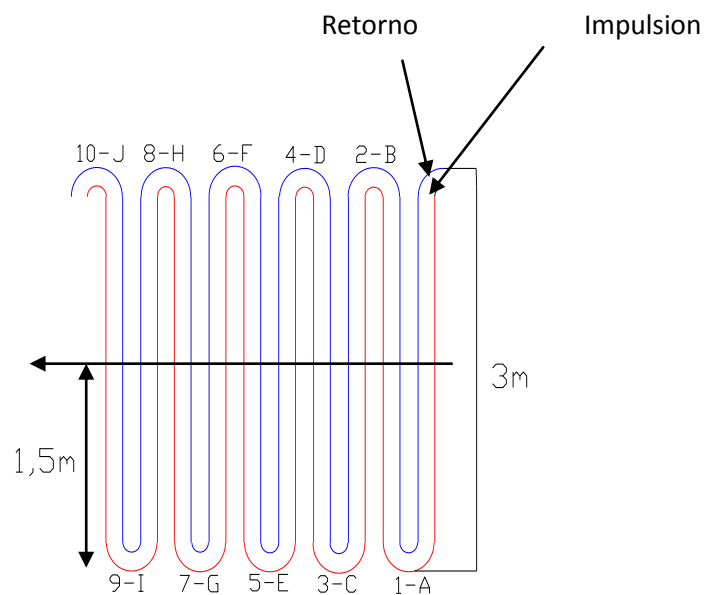


Figura 4.18. Relación de tramos de impulsión y retorno.

La temperatura en el punto medio de cada tramo a lo largo del punto medio del circuito son los dados en la tabla (4.4):

Tramo Impulsión	T_{media}	Tramo Retorno	T_{media}
1	39,9	A	33,7
2	39,75	B	33,8
3	39,5	C	33,9
4	39,3	D	34,1
5	39,1	E	34,2
6	38,9	F	34,3
7	38,7	G	34,5
8	38,6	H	34,6
9	38,4	I	34,7
10	38,2	J	34,9
11	38,1	K	35
12	37,8	L	35,1
13	37,6	M	35,2
14	37,4	N	35,4
15	37,2	O	35,5
16	37,1	P	35,6
17	36,9	Q	35,8
18	36,7	R	36
19	36,5	S	36,1
20	36,3	T	36,2

Tabla 4.4. Temperaturas en el punto medio de cada tramo de tubería (UNE EN 12241).

La Temperatura media a lo largo del punto medio de cada tramo de tubería del circuito, T_{mt} , según la norma UNE EN 12241, es de 36,5°C.

La temperatura media entre las tuberías a lo largo del punto medio del circuito, calculada según la norma UNE EN 15377, es de 37,2°C.

La diferencia de temperatura entre el agua de calefacción y la habitación según la ecuación (4.28) para los datos obtenidos de la aplicación de la norma es:

$$\Delta T_{aire-agua} = \frac{|T_{imp} - T_{ret}|}{Ln \left(\frac{|T_{amb} - T_{imp}|}{|T_{amb} - T_{ret}|} \right)} \quad (4.28)$$

Donde:

T_{imp} , es 40°C (Temperatura utilizada para nuestro sistema)

T_{ret} , es 34°C (Obtenida como resultado de la aplicación de la norma UNE EN 12241)

T_{amb} , es 21°C

$$\Delta T_{aire-agua} = \frac{|40 - 34|}{Ln \left(\frac{|21 - 40|}{|21 - 34|} \right)} = \frac{6}{0,38} = 15,8^{\circ}\text{C}$$

La temperatura media del fluido T_{mf} se obtiene de acuerdo con la norma UNE EN 1264, según 4.29:

$$\Delta T_{aire-agua} = T_{mf} - T_{amb} \quad (4.29)$$

La temperatura media del agua en las tuberías queda:

$$T_{mf} = \Delta T_{aire-agua} + T_{amb}$$

$$T_{mf} = 15,8 + 21 = 36,8^\circ C$$

- **Temperatura media final a lo largo del punto medio del circuito.**

Calculadas, de acuerdo con la norma, las temperaturas que intervienen en la obtención de la temperatura media a lo largo del punto medio del circuito, nos queda:

$$T_m = \frac{T_{mt} + T_{mc}}{2} = \frac{36,5 + 37,2}{2} = 36,85^\circ C$$

Donde:

T_m , Temperatura media a lo largo del punto medio del eje en el plano de los tubos ($^\circ C$)

T_{mt} , Temperatura media a lo largo del punto medio de cada tramo de tubería del circuito. Pto. verde ($^\circ C$)

T_{mc} , Temperatura media entre las tuberías a lo largo del punto medio del circuito. Pto. amarillo ($^\circ C$)

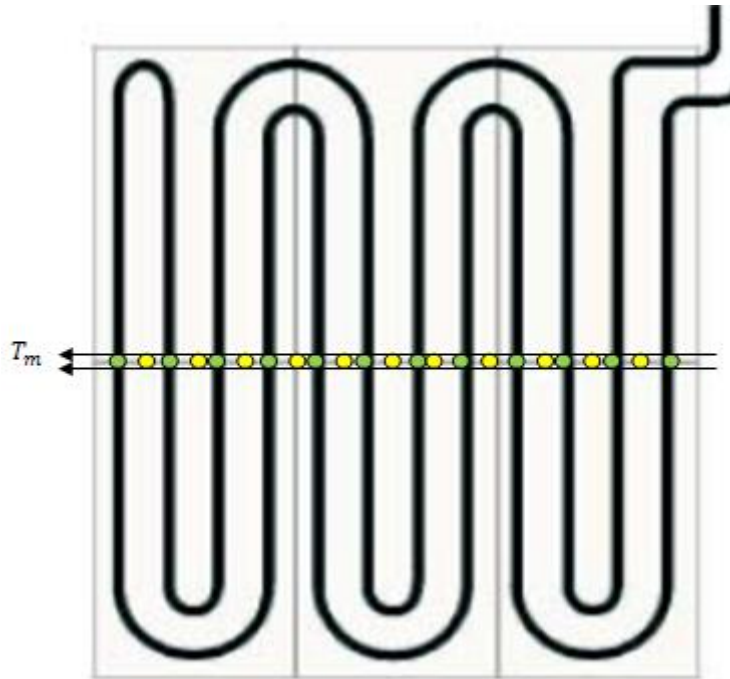


Figura 4.19. Temperatura media a lo largo del punto medio del eje en el plano de los tubos.

- **Perfil de temperaturas a nivel de los tubos**

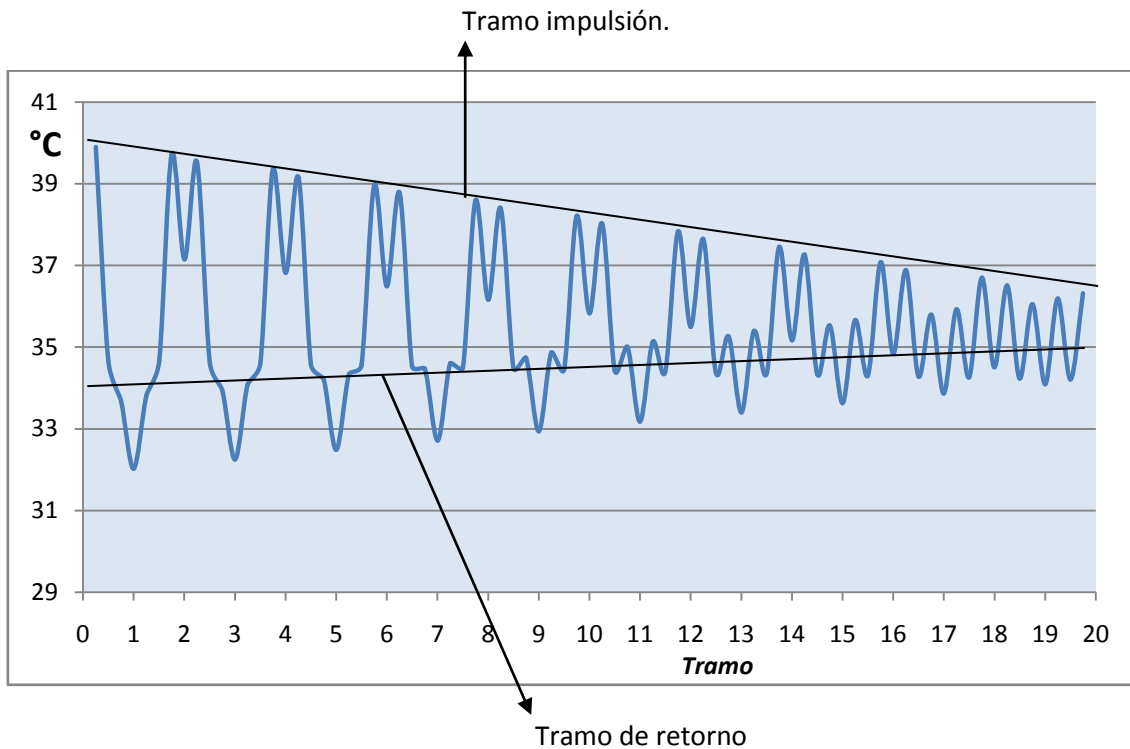


Figura 4.20. Perfil de temperaturas a nivel de los tubos.

La figura 4.20 representa la evolución de la temperatura a lo largo del punto medio en el plano de los tubos que da como resultado de la aplicación de las normas 12241 y 15371. Las caídas bruscas de temperatura representan la temperatura entre las tuberías.

Aunque imperceptible en la gráfica, la temperatura media entre las tuberías no se encuentra justo en el punto medio, sino que se encontrará desplazada hacia la tubería de mayor temperatura, ya que de la aplicación de las normas UNE EN 12241 y UNE EN 15371, el punto donde se encuentra la temperatura media estará más próximo a la tubería de mayor temperatura.

- **Pérdidas térmicas en el suelo**

Conocida la temperatura media a lo largo del punto medio del eje en el plano de los tubos, T_m , podemos calcular las pérdidas térmicas que se produce en el suelo en régimen permanente. Debemos aclarar que aunque las denominemos pérdidas, las pérdidas efectivas serán las que van en dirección descendente, ya que en dirección ascendente se dirigen hacia el interior del local, lo que es beneficioso:

- **Dirección descendente:**

$$q_2 = A \cdot U_2 \cdot (T_m - T_t)$$

$$q_2 = 24,55 \cdot 1,56 \cdot 10,7 = 410 \text{ W}$$

- **Dirección ascendente:**

$$q_1 = A \cdot U_1 \cdot (T_m - T_i)$$

$$q_1 = 24,55 \cdot 6,7 \cdot 16 = 2592 \text{ W}$$

- **Convección:**

$$q_c = h_c \cdot A \cdot (T_s - T_i)$$

$$q_c = 1011,5 \text{ W}$$

Los valores de h_c , coeficiente de convección natural ($\text{W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$) y de T_s , temperatura superficial del suelo y T_i , temperatura ambiente interior, para obtener la temperatura de película, se detallan a continuación en el cálculo del coeficiente de convección natural.

Para el cálculo del coeficiente de convección h_c , consideramos que las puertas y ventanas se mantienen cerradas, aunque siempre existirá una ventilación residual consecuencia de la renovación mínima o infiltración del aire. Con lo que el movimiento del aire dentro del local será resultado del gradiente de la densidad del aire en las proximidades de la superficie del suelo.

Para el cálculo del coeficiente de convección natural seguiremos el método descrito por J.P. Holman (Transferencia de Calor, 1998):

- Nusselt

$$Nu_f = C \cdot (Gr_f Pr_f)^m \quad (4.30)$$

Donde el subíndice f indica que las propiedades en los grupos adimensionales se evalúan a la temperatura de película T_f :

$$T_f = \frac{T_s + T_i}{2}$$

En nuestro caso, calcularemos T_f a presión atmosférica para una temperatura ambiente, T_i , de 20°C (temperatura interior a utilizar según UNE EN 1264) y para la temperatura superficial del suelo, T_s , escogeremos el valor límite que establece la norma de 29°C , con lo que abarcamos todo el rango de temperaturas en los que se puede encontrar la superficie del suelo con el sistema en funcionamiento.

La temperatura de película es:

$$T_f = \frac{29 + 20}{2} = 24,5 \text{ }^\circ\text{C} = 297,5 \text{ K}$$

A efectos de cálculo seleccionamos las propiedades del aire a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ que son según el ANEXO A:

$$\beta = \frac{1}{298} = 3,35 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} \quad k = 0,026 \frac{\text{W}}{\text{m } ^\circ\text{C}}$$

$$\nu = 1,54 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \quad Pr = 0,7$$

Y las constantes C y m dependerán de Ra.

- Rayleigh

Es el producto del número de Grashof por el número de Prandtl.

$$Ra = Gr \cdot Pr$$

Calculando Rayleigh según (4.30):

$$Ra = GrPr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_{ms} - T_{amb}) \cdot L^3}{\nu^2} \cdot Pr \quad (4.31)$$

La dimensión característica que se utiliza en los números de Nusselt y Grashof depende de la geometría. En nuestro caso se trata de una superficie horizontal con flujo constante.

$$L = \frac{Area}{Perimetro} = \frac{24,55}{21,9} = 1,12 \text{ m}$$

Introduciendo datos en (4.30), queda:

$$Ra = GrPr = \frac{9,8 \cdot 3,35 \cdot 10^{-3} \cdot (30 - 20) \cdot 1,12^3}{(1,54 \cdot 10^{-5})^2} \cdot 0,7 = 1,36 \cdot 10^9$$

Para $GrPr > 2 \cdot 10^8$ según J.P. Holman (Transferencia de Calor 1998) la ecuación (4.30) para placas horizontales es:

$$Nu = 0,16(GrPr)^{1/3} = 177,3$$

El coeficiente de convección natural:

$$h_c = \frac{Nu \cdot k}{L} = \frac{177,3 \cdot 0,026}{1,12} = 4,12 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

- **Radiación:**

$$q_r = h_r \cdot A \cdot (T_s - T_i)$$

Donde:

h_r , Coeficiente de radiación (5,23 W/m² °C según ASHRAE)

T_s , Temperatura superficial del suelo (°C)

T_i , Temperatura ambiente interior (°C)

Los valores de ambas temperaturas son los de la temperatura de película utilizadas para el cálculo del coeficiente de convección.

$$q_r = 1284 \text{ W}$$

- **Potencia térmica del suelo radiante**

Será la suma de la emisión térmica, calculada de acuerdo con la norma UNE EN 1264, 1680 W, más la pérdida térmica descendente, 410 W, en régimen estacionario, dando como resultado la potencia térmica total del suelo radiante:

$$Q_T = 1680 + 410 = 2090 \text{ W}$$

- **La potencia útil producida por el generador de calor:**

El generador de calor de nuestra instalación es una bomba de calor. La potencia útil se obtendrá de (4.32), (*Manual técnico Uponor*)

$$P_u = C_w \cdot C_p \cdot (T_{imp} - t_{ret}) = 800 \cdot 1 \cdot 5 = 4000 \text{ Kcal/h} = 4,65 \text{ kW} \quad (4.32)$$

Donde:

C_w , Caudal de agua 800 Kg/h

C_p , Calor específico del agua (4,18 KJ/Kg °C = 1 Kcal/Kg °C)

$$T_{imp} - t_{ret} = 5^\circ\text{C}$$

Como se explicó anteriormente en el punto 4.3.1, consideramos un salto térmico de 5°C por condiciones de diseño según la norma UNE EN 1264. El salto térmico en nuestro sistema, aplicando la norma UNE EN 12241, es de 6°C, por lo que la potencia aplicando la ecuación 4.32 será de 5,6 kW.

5. RESUMEN DE RESULTADOS

En este capítulo se realiza un recopilatorio de los resultados obtenidos en régimen estacionario, antes de realizar la simulación en régimen transitorio.

Para una temperatura de confort de 21°C y una temperatura exterior de 6°C (según la Guía Técnica de Condiciones Climáticas Exteriores de Proyecto), la carga térmica total del local, en régimen permanente, es 1746,2 W, despreciando las cargas internas. Los valores obtenidos de la aplicación de la normativa vigente para la obtención de las temperaturas del suelo son:

Temperaturas del suelo	°C
Temperatura superficial del suelo	26,5
Temperatura media a lo largo del punto medio del circuito	36,85
Temperatura del terreno con el sist. encendido en reg. estacionario	26,3

Tabla 5.1. Rango temperaturas del suelo

Propiedades ter. del suelo	U (W/m² °C)	R (m² °C/W)
Dirección Ascendente	6,7	0,15
Dirección Descendente	1,56	0,64

Tabla 5.2. Propiedades del suelo.

Las pérdidas térmicas que se producen en el suelo son:

- En dirección descendente solo existe transferencia de calor por conducción ya que el suelo está en contacto con el terreno.

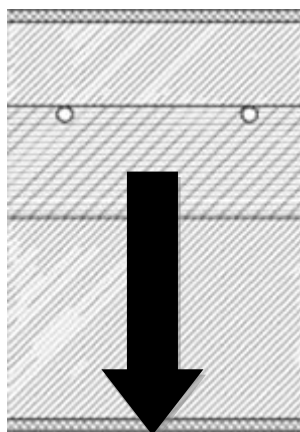


Figura 5.1. Dirección descendente.

Pérdida térmica descendente es de 410 W

- En dirección ascendente tenemos transferencia de calor por conducción en el interior del suelo desde el plano de los tubos.

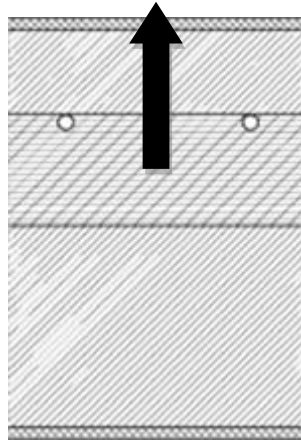


Figura 5.2. Dirección ascendente.

Pérdida térmica ascendente por conducción es de 2592 W

- El efecto de la convección, provocado por el calentamiento de la superficie del suelo, en el que la diferencia de temperatura entre la superficie del suelo y la temperatura interior provoca que el calor ascienda.

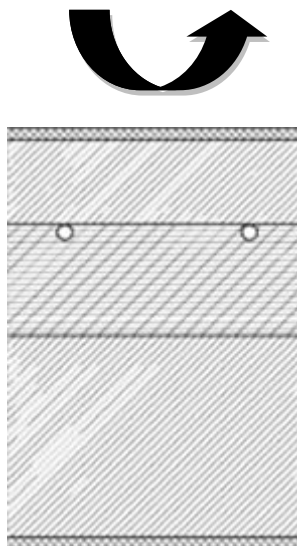


Figura 5.3. Convección.

Pérdida térmica por convección es de 1011,5 W

- La radiación que emite el suelo es:

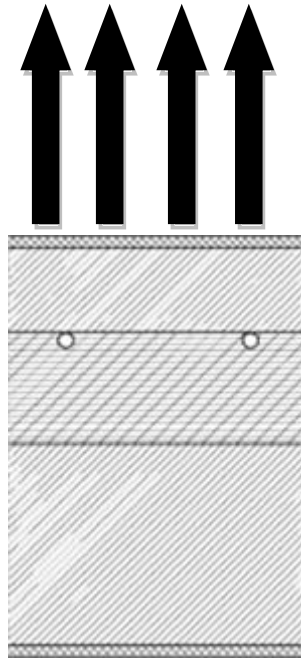


Figura 5.4. Radiación.

Pérdida térmica por radiación es de 1284 W

- Las pérdidas térmicas por los laterales las consideramos despreciables, ya que la superficie es pequeña y la cantidad de calor perdido no influye para el correcto funcionamiento del sistema.

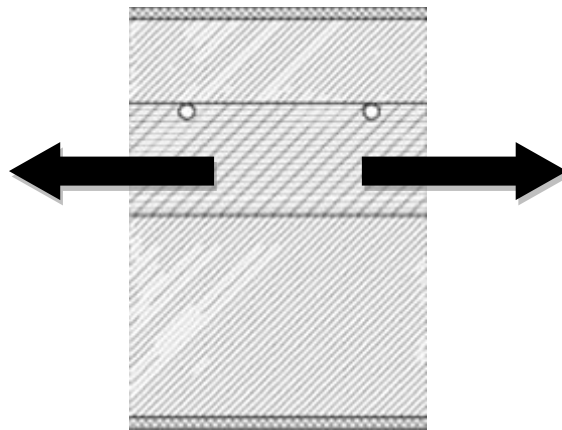


Figura 5.4. Conducción en dirección lateral

Suelo Radiante

En el siguiente cuadro se resumen los valores obtenidos para el diseño y dimensionamiento del suelo radiante de acuerdo con la norma:

Número de Circuitos	2
Longitud Circuitos	120 m
Temperatura de Impulsión	40 °C
Salto Térmico de diseño	5 °C
Paso	0,1 m
Emisión Térmica en régimen permanente	70 W/m ²
Temperatura media del Circuito	37,5 °C
Temp. Media Superficial del suelo	26,5 °C
Caudal	0,22 l/s
Desviación media log.	16,6 °C
Perdida de Carga	35,75 Kpa

Tabla 5.3. Características del sistema de suelo radiante.

La potencia térmica total del suelo radiante, resultado de la suma de la emisión térmica (calculada en el punto 4.2) y de las pérdidas térmicas descendentes (punto 4.4), necesaria para mantener las condiciones de confort y bienestar en régimen permanente será de 2090 W

La potencia producida por el generador de calor para un salto térmico de 6°C, obtenido de la aplicación de la norma UNE EN 12241, es 5,6 kW.

6. FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA INERCIA TÉRMICA DE LOS MATERIALES

Una definición sencilla de inercia térmica es:

Capacidad del material de conservar la energía térmica recibida e ir liberándola progresivamente.

En nuestro caso calcularemos la inercia térmica del suelo. Durante el periodo de conexión del sistema de calefacción de suelo radiante, el suelo acumula calor, que una vez se desconecta el sistema, éste va liberando hasta la puesta en marcha al día siguiente.

A continuación se detallan los principales factores que intervienen en el cálculo de la inercia térmica y los efectos de ésta en el ambiente interior.

- **Capacidad Térmica**

El almacenamiento térmico depende, principalmente, de la capacidad térmica del material, entendiéndose por tal, el producto de la masa por su calor específico. Por lo tanto, la energía almacenada desde una temperatura inicial y uniforme T_0 y final T_f , tiene por expresión:

$$C_t = m \cdot C_p \cdot \Delta T = (\rho \cdot V) C_p \Delta T \quad (6.1)$$

Donde:

ρ , densidad (Kg/m³)

V , Volumen (m³)

C_p , Calor específico (J/Kg K)

ΔT , Incremento de temperatura (°C)

Como observamos en la ecuación 6.1, la capacidad térmica depende de la densidad, volumen y el calor específico, pero la elección de un material con buena inercia térmica dependerá además del tiempo de retención de la energía calorífica acumulada, así, lo que interesa, es que la energía retenida sea liberada lentamente, lo cual depende de la característica de los materiales denominada difusividad térmica (α) y se expresa como:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p} \text{ (m}^2/\text{s)} \quad (6.2)$$

Donde:

λ , Conductividad térmica (W/m °C)

De la ecuación (6.2) de la difusividad se deduce que, cuanto mayor sea α , más rápidamente se difundirá el calor por el material. Esto puede verse examinando las propiedades físicas que

forman α . Un valor grande de α resulta, o por un valor alto de la conductividad térmica, lo que indicaría una transferencia rápida del calor, o por un valor bajo de la capacidad térmica, $\rho \cdot C_p$. Un valor bajo en la capacidad térmica podría significar que se absorbe menos energía de la que se mueve por el material y se usa para elevar la temperatura del material; así se dispondrá de más energía para transferir.

- ***Tipos de almacenamiento térmico***

En función del medio por el que se produce el almacenamiento térmico puede ser:

- a) Almacenamiento térmico directo, es cuando la acción de los rayos solares inciden de forma directa a través de un medio transparente sobre el área de almacenamiento.
- b) Almacenamiento térmico indirecto, es cuando el área de almacenamiento aunque esté fuera de la incidencia directa de los rayos solares, sobre ella recae parte de la acción radiante. Este caso suele darse por las reflexiones de emisión calorífica o fenómenos convectivos intermedios ocasionados por la radiación directa.
- c) Almacenamiento térmico remoto, es el producido no por una radiación directa o indirecta, sino por un fenómeno de transferencia térmica directa. Este es nuestro caso, almacenamiento producido por el calentamiento del sistema de calefacción radiante

- ***Situación del material aislante en el cerramiento***

La posición del aislante dentro del cerramiento es fundamental para un mayor aprovechamiento del calor acumulado. En nuestro caso, la colocación del aislante esta justo por debajo de las tuberías para que la mayor parte del calor se libere hacia el interior del local, tanto, cuando el sistema este en funcionamiento, como cuando esté desconectado y comience a ceder calor.

- ***Efectos de la inercia térmica***

El efecto de la inercia térmica consiste en modificar en mayor o en menor grado la diferencia de temperaturas interiores. Cuando se produce un descenso brusco de la temperatura en el exterior, antes que enfriar el aire interior, se produce una cesión de calor del suelo al interior. El objetivo es que la temperatura del interior fluctúe solo levemente, siempre dentro de los márgenes del bienestar, y sin consumos excesivos de energía.

7. SIMULACIÓN EN RÉGIMEN TRANSITORIO

En este capítulo realizaremos una simulación en régimen transitorio donde observaremos el comportamiento del suelo radiante y la influencia de la inercia térmica de muros, techo y suelo, sobre la temperatura interior y la demanda de calefacción.

Durante el periodo de conexión del sistema de calefacción, los muros, suelos y mobiliario que se encuentran en el local acumulan calor, que una vez éste se desconecta, lo liberan. El calor transmitido durante el periodo de desconexión, debe ser aportado por el sistema de calefacción cuando se conecta al día siguiente.

La simulación del comportamiento del suelo radiante y su influencia en las temperaturas del local, se hace para un día (24h). El periodo de funcionamiento del sistema de calefacción está comprendido entre las 8:00h y las 18:00h. La simulación se realiza para el día más frío de cada mes del periodo que comprende el uso de calefacción, que va del 1 de Noviembre al 30 de Abril.

El método utilizado para la realización de la simulación del comportamiento del sistema de calefacción, se hará de acuerdo a la norma **UNE EN 15377-3** *Diseño de Sistemas Empotrados de Calefacción y Refrigeración por Agua*. En esta norma se encuentra el método para obtener los resultados del comportamiento dinámico y proporcionar un método que integre activamente la masa del local (inercia térmica), para así reducir las cargas punta y con ello el tamaño de los sistemas y proporcionar un ahorro energético. La norma introduce el concepto de los sistemas termoactivos del edificio (TABS), en nuestro caso, es un sistema de calefacción por agua, donde los tubos están empotrados en el núcleo central de la estructura de hormigón del suelo. La transferencia de calor se produce entre el agua (tubos) y el hormigón, entre el núcleo del hormigón y la superficie del local y entre las superficies y el local.

A continuación se recoge en las tablas 7.1, 7.2 y 7.5 las condiciones iniciales de la simulación para el primer intervalo ($n=0$) a las 8:00 horas y los datos de todos los elementos que intervienen en ella:

- Datos referidos al circuito
- Datos referentes al local
- Datos referentes al suelo

A continuación de los datos de partida, desarrollamos la metodología de cálculo y las condiciones impuestas en la simulación.

- Datos referidos al circuito

Caudal	\dot{m}	0,009 Kg/m ² s
Capacidad calorífica del agua	C_a	4180 J/KgK
Distancia entre tubos	T	0,1 m
Superficie del suelo	A_s	24,55 m ²
Longitud del circuito	L_c	120 m
Temperatura de impulsión	T_{imp}^{n-1}	40°C
Temperatura inicial a nivel de los tubos	T_m^0	10°C
Resistencia térmica total del circuito	R_t	0,024 m ² °C /W

Tabla 7.1. Características del circuito

R_t , es la resistencia térmica total del circuito definida en la figura 4.16 y calculada en el punto 4.3.2 de acuerdo con la norma.

- Datos referentes al local.

Los datos referentes al local son los relacionados con muros y techo. Estos datos son los que aparecen en la tabla 7.2.

Área de los muros y techo	A_M	95 m ²
Temperatura sup. inicial de muros y techo	$T_{s,M}^0$	10°C
Capacidad térmica de muros y techo	C_M	251270 J/m ² K
Resistencia térmica sup. de muros y techo	$R_{s,M}$	0,22 m ² °C/W
Temperatura inicial del ambiente interior	T_{aire}^0	10°C

Tabla 7.2. Características del local.

El cálculo de la capacidad térmica y la resistencia térmica superficial de muros y techo se muestran a continuación.

Calculo de la capacidad térmica de muros y techo

Según la norma UNE EN 13790 el cálculo de la capacidad térmica es:

$$C_t = \sum \rho_i \cdot C_{pi} \cdot e_i$$

COMPOSICION	e (m)	ρ (Kg/m ³)	λ (W/mK)	C_p (J/KgK)
Bloque Hormigón	0,19	1200	0,49	1000
Poliestireno Expandido	0,04	15	0,037	1450
Cámara de aire	0,05	1,3	0,9	1003
Enlucido de yeso	0,028	800	0,3	1000

Tabla 7.3. Composición de muros y techo.

$$C_{hormigon} = \rho \cdot C_p \cdot e = 228000 \text{ J/m}^2\text{°C}$$

$$C_{eps} = \rho \cdot C_p \cdot e = 870 \text{ J/m}^2\text{°C}$$

$$C_{yeso} = \rho \cdot C_p \cdot e = 22400 \text{ J/m}^2\text{°C}$$

$$C_M = 228000 + 870 + 22400 = 251270 \text{ J/m}^2\text{°C}$$

Resistencia térmica superficial de muros y techo de acuerdo con la norma

$$R_{s,M} = \frac{1}{h_i} + R_{sup,M} \quad (7.1)$$

h_i , Coeficiente de convección interior según CTE

$R_{sup,M}$, Resistencia de la capa superficial interior del muro y techo (enlucido de yeso, NBE-CT-79)

$$R_{s,M} = 0,13 + 0,09 = 0,22 \text{ m}^2\text{°C/W}$$

• Datos referentes al suelo

Para la realización de la simulación y de acuerdo con la norma, se deben realizar particiones en el suelo, las que sean necesarias, para el correcto cálculo. La norma señala que los materiales que limitan con los tubos formen una partición, así en nuestro caso, las particiones del suelo son las que se muestran en la figura 7.1:

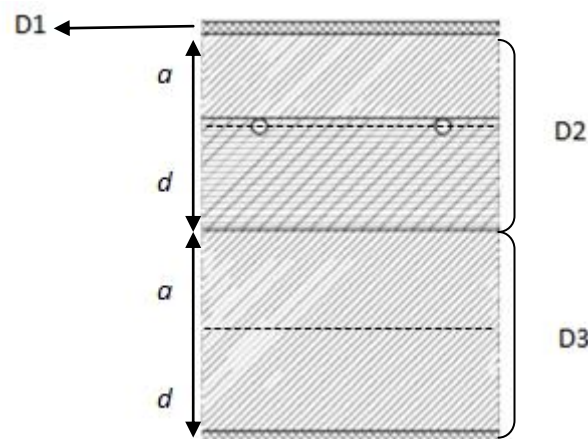


Figura 7.1. Particiones del suelo.

Donde cada partición, se subdivide en dos partes iguales, diferenciando la parte ascendente con el subíndice a y la parte descendente con el subíndice d , desde el punto medio de cada partición. La partición D1, aunque no aparezca en la figura, también se subdivide en dos partes

y está formada por la baldosa, la partición D2 está formada por el hormigón y el aislante y la partición D3 por la última capa de hormigón.

Para el suelo debemos calcular la capacidad térmica de cada partición y su resistencia térmica.

Calculo de la Capacidad térmica de las particiones

COMPOSICION	e (m)	λ (m °C/W)	R (m²°C/W)	ρ (Kg/m³)	C_p (J/KgK)
Hormigón Armado	0,02	1,63	0,012	2400	1000
Poliestireno Expandido	0,02	0,033	0,6	25	1450
Plástico	0,002	0,19	0,01	1200	1200
Hormigón	0,03	1,63	0,02	2400	1000
Baldosa	0,02	1,05	0,02	2000	1250
Aire interior			0,13		

Tabla 7.4. Propiedades de los materiales que componen el suelo

Realizando la misma operación que hicimos para muros y techo, la capacidad térmica de las particiones es:

$$C_{t,D1} = \rho \cdot C_p \cdot e = 25000 \text{ J/m}^2\text{°C}$$

$$C_{t,D2} = \Sigma \rho \cdot C_p \cdot e = 72725 \text{ J/m}^2\text{°C}$$

$$C_{t,D3} = \rho \cdot C_p \cdot e = 48000 \text{ J/m}^2\text{°C}$$

Resistencia superficial del suelo de acuerdo con la norma

$$R_{s,sup} = \frac{1}{h_i} + R_{a,D1} + \frac{1}{\alpha} \quad (7.2)$$

Donde:

h_i , Coeficiente de convección interior según CTE (0,10 W/m² °C)

$R_{a,D1}$, Resistencia ascendente de la baldosa. (0,009 m² °C/W)

$\frac{1}{\alpha}$, Resistencia de transferencia de calor en la superficie del suelo radiante según UNE EN 1264 (0,0926 m² °C/W)

$$R_{s,sup} = 0,10 + 0,009 + 0,0926 = 0,2 \text{ m}^2\text{°C/W}$$

A continuación, se exponen en la tabla 7.5 los valores de las resistencias de cada partición en ambas direcciones y la capacidad térmica calculada para cada una.

Resistencia superficial del suelo	$R_{s,sup}$	0,2 m ² °C/W
Resistencia ascendente D1 (baldosa)	$R_{a,D1}$	0,009 m ² °C/W
Resistencia descendente D1 (baldosa)	$R_{d,D1}$	0,009 m ² °C/W
Resistencia ascendente D2 (hormigón)	$R_{a,D2}$	0,018 m ² °C/W
Resistencia descendente D2 (aislante)	$R_{d,D2}$	0,6 m ² °C/W
Resistencia ascendente D3 (hormigón)	$R_{a,D3}$	0,006 m ² °C/W
Resistencia descendente D3 (hormigón)	$R_{d,D3}$	0,006 m ² °C/W
Temperatura superficial inicial	$T_{s,sup}^0$	10°C
Capacidad térmica de la baldosa(D1)	$C_{t,bal}$	25000 J/m ² °C
Capacidad térmica partición D2	$C_{t,D2}$	72725 J/m ² °C
Capacidad térmica partición D3	$C_{t,D3}$	48000 J/m ² °C

Tabla 7.5. Datos del suelo

El cálculo de la resistencia se obtiene de:

$$R = \frac{e}{\lambda}$$

Para posteriores cálculo el subíndice de la partición D1 la nombraremos con el subíndice “bal”, debido a que es la única partición que está compuesta por un solo material.

7.1 CALCULO DE LAS CARGAS DE CALOR QUE ACTUAN EN EL LOCAL

- **Carga de convección de acuerdo con la norma 15377:**

$$Q_{conv}^n = 0,15 \cdot Q_{Transm}^n + Q_{IntConv}^n \quad (7.3)$$

- **Carga por radiación de acuerdo con la norma 15377:**

$$Q_{Rad}^n = 0,85 \cdot Q_{Transm}^n + Q_{IntRad}^n + Q_{Sun}^n \quad (7.4)$$

Siendo Q_{Transm}^n la carga de transmisión del local en el intervalo de tiempo actual. Donde Q_{Transm}^0 es la carga de transmisión inicial de la simulación, 8:00h, de entrada al local desde el exterior.

n es el intervalo de tiempo, en nuestro caso cada 10 min. (600 s)

Q_{Sun}^n , ganancia solar en el local, lo consideramos despreciables por considerar las condiciones más desfavorables.

Q_{IntRad}^n y $Q_{IntConv}^n$ son las ganancias de calor por radiación y convección respectivamente, debida al equipo eléctrico o al equipo humano que consideraremos despreciables para situarnos en las condiciones más desfavorables.

7.2 CALCULO DE LAS CARGAS QUE ACTUAN SOBRE LAS SUPERFICIES

Para el correcto desarrollo de la simulación debemos conocer las cargas de radiación y convección que se producen entre las superficies de muros, techo y suelo y la temperatura del interior. De acuerdo con la norma obtendremos:

- **Carga de calor por convección en los muros, Q_{convM}^n (UNE EN 15377):**

$$Q_{convM}^n = \frac{T_{aire}^n - T_{s,M}^{n-1}}{R_M} \cdot A_M \text{ (W)} \quad (7.5)$$

Donde:

A_M , Área de los muros y techo (m^2)

$T_{s,M}^{n-1}$, Temperatura superficial del muro en el intervalo anterior ($^{\circ}C$)

T_{aire}^n , Temperatura del aire en el intervalo n ($^{\circ}C$)

R_M , Resistencia superficial de los muros y techo ($m^2 \text{ }^{\circ}C/W$)

- **Cargas de calor por convección del suelo, $Q_{conv,s}^n$ (UNE EN 15377):**

$$Q_{conv,s}^n = \frac{T_{aire}^n - T_{bal}^{n-1}}{R_{s,sup}} \cdot A_s \text{ (W)} \quad (7.6)$$

Donde:

T_{aire}^n , Temperatura del aire en el intervalo n ($^{\circ}C$)

A_s , Área del suelo (m^2)

T_{bal}^{n-1} , Temperatura en el punto medio del espesor de la baldosa (partición D1) en el instante anterior ($^{\circ}C$)

$R_{s,sup}$, Resistencia superficial del suelo ($m^2 \text{ }^{\circ}C/W$)

Señalamos que, de acuerdo con la norma, para el cálculo de la carga de convección del suelo la norma utiliza la temperatura del punto medio del espesor de la baldosa que se calcula en el punto 7.4, ecuación 7.11.

- **Cargas de calor por radiación en los muros, $Q_{Rad,M}^n$ (UNE EN 15377):**

$$Q_{Rad,M}^n = Q_{Rad}^n \cdot \frac{A_M}{2 \cdot A_S + A_M} \quad (W) \quad (7.7)$$

- **Carga de calor por radiación en el suelo, $Q_{Rad,S}^n$ (UNE EN 15377):**

$$Q_{Rad,S}^n = Q_{Rad}^n \cdot \frac{A_S}{2 \cdot A_S + A_M} \quad (W) \quad (7.8)$$

Donde:

Q_{Rad}^n , Carga de radiación que actúa en el local de acuerdo con la norma (W)

A_M , Área de muros y techo (m²)

A_S , Área del suelo (m²)

- **Densidad de flujo térmico en el suelo, q_s^n (UNE EN 15377):**

$$q_s^n = \frac{Q_{Rad,S}^n + Q_{conv,s}^n}{A_s} \quad (W/m^2) \quad (7.9)$$

7.3 CALCULO DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DE LOS MUROS Y TECHO

- **Calculo de la temperatura superficial de los muros, T_M^n (UNE EN 15377):**

$$T_{s,M}^n = \frac{(Q_{Rad,M}^n + Q_{convM}^n) \cdot \Delta t}{C_M \cdot A_M} + T_{s,M}^{n-1} \quad (7.10)$$

Donde:

$Q_{Rad,M}^n$, Calor por radiación en los muros (W)

Q_{convM}^n , Calor por convección en muros y techo (W)

C_M , Capacidad térmica de muros y techo (J/m² °C)

A_M , Área de muros y techo (m²)

$T_{s,M}^{n-1}$, Temperatura superficial de los muros y techo en el instante anterior (°C)

7.4 CALCULO DE LAS TEMPERATURAS DE LAS PARTICIONES DEL SUELO

De acuerdo a las particiones realizadas en el suelo calcularemos las temperaturas medias en el punto medio de cada una de ellas.

- **Calculo de la temperatura en el punto medio del espesor de la baldosa, T_{bal}^n , temperatura media de la partición D1 (UNE EN 15377):**

$$T_{bal}^n = \frac{\left(q_s^n + \frac{T_{m,D2}^{n-1} - T_{bal}^{n-1}}{R_{d,D1} + R_{a,D2}} \right) \cdot \Delta t}{C_{t,bal}} + T_{bal}^{n-1} \quad (7.11)$$

Donde:

$T_{m,D2}^{n-1}$, Es la temperatura media en el eje de los tubos, la partición D2 (°C)

$R_{d,D1}$, Resistencia descendente de la partición D1 (m² °C/W)

$R_{a,D2}$, Resistencia ascendente de la partición D2 (m² °C/W)

$C_{t,bal}$, Capacidad térmica de la baldosa (m² °C/W)

q_s^n , Densidad de flujo térmico en el suelo (W/m²)

- **Calculo de la temperatura media a nivel de los tubos, $T_{m,D2}^n$ (UNE EN 15377):**

El cálculo de la temperatura media a nivel de los tubos (partición D2), dependerá de si el sistema está en funcionamiento o desconectado, así nos queda:

Sistema en funcionamiento

Con el sistema en funcionamiento la temperatura media en la partición D2, a nivel de los tubos queda de la forma (7.12), considerando la temperatura en las tuberías y la temperatura entre las tuberías:

$$T_{m,D2}^n = \frac{\left[\left(\frac{T_{D1}^{n-1} - T_{m,D2}^{n-1}}{R_{d,D1} + R_{a,D2}} \right) + \left(\frac{T_{D3}^{n-1} - T_{m,D2}^{n-1}}{R_{d,D2} + R_{a,D3}} \right) + (T_{imp} - T_{m,D2}^{n-1}) \cdot \frac{1}{R_t} \right] \cdot \Delta t}{C_{t,D2}} + T_{m,D2}^{n-1} \quad (7.12)$$

Donde:

T_{imp}^n , Temperatura de impulsión, constante en todo el periodo de funcionamiento e igual a 40°C

$R_{d,D1}$, Resistencia descendente de la partición D1 (m² °C/W)

$R_{a,D2}$, Resistencia ascendente de la partición D2 (m² °C/W)

$R_{d,D2}$, Resistencia descendente de la partición D2 ($\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$)

$R_{a,D3}$, Resistencia ascendente de la partición D3 ($\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$)

$C_{t,D2}$, Capacidad térmica de la partición D2 ($\text{J/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$)

T_{D1}^{n-1} , Temperatura de la partición D1 en el instante anterior ($^\circ\text{C}$)

T_{D3}^{n-1} , Temperatura de la partición D3 en el instante anterior ($^\circ\text{C}$)

A_s , Área del suelo ($24,55 \text{ m}^2$)

$T_{m,D2}^{n-1}$, Temperatura media a nivel de los tubos en el instante anterior ($^\circ\text{C}$)

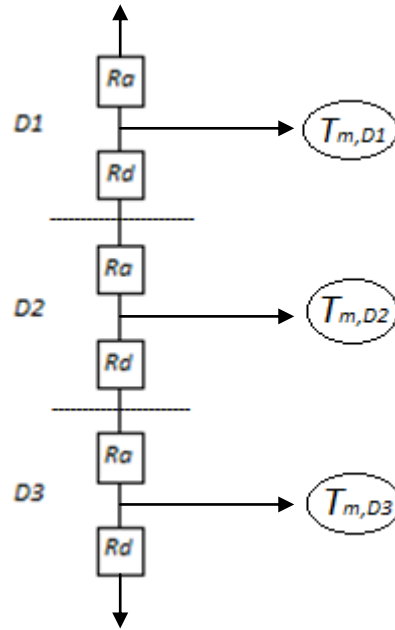


Figura 7.2. Red de resistencias de las particiones del suelo

Sistema parado

Con el sistema parado, la temperatura media en el eje de los tubos es (7.13):

$$T_{m,D2}^n = \frac{\left[\left(\frac{T_{D1}^{n-1} - T_{m,D2}^{n-1}}{R_{d,D1} + R_{a,D2}} \right) + \left(\frac{T_{D3}^{n-1} - T_{m,D2}^{n-1}}{R_{d,D2} + R_{a,D3}} \right) \right] \cdot \Delta t}{C_{t,D2}} + T_{m,D2}^{n-1} \quad (7.13)$$

Donde:

$R_{d,D1}$, Resistencia descendente de la partición D1 ($\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$)

$R_{a,D2}$, Resistencia ascendente de la partición D2 ($\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$)

$R_{d,D2}$, Resistencia descendente de la partición D2 ($\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$)

$R_{a,D3}$, Resistencia ascendente de la partición D3 ($\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$)

$C_{t,D2}$, Capacidad térmica de la partición D2 ($\text{J/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$)

T_{D1}^{n-1} , Temperatura de la partición D1 en el instante anterior ($^\circ\text{C}$)

T_{D3}^{n-1} , Temperatura de la partición D3 en el instante anterior ($^\circ\text{C}$)

Temperatura de retorno

En función de 7.12 y 7.13 podemos calcular la temperatura de retorno según 7.14:

$$T_{ret}^n = T_{imp}^n - \frac{(T_{imp}^n - T_{m,D2}^{n-1})}{R_t} \cdot \dot{m} \cdot C_a \cdot A_s \quad (7.14)$$

Donde:

R_t , Resistencia entre la temperatura de impulsión y la temperatura media de la capa conductora ($\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$)

\dot{m} , Caudal ($\text{Kg/m}^2\text{s}$)

C_a , Calor específico del agua (4180 J/KgK)

De acuerdo con la norma, tanto con el sistema parado o en funcionamiento, las ecuaciones 7.12 y 7.13 se aplican hasta la penúltima partición realizada en el suelo, lo que significa que en nuestro caso, la partición D3 se desprecia para el cálculo de $T_{m,D2}^n$.

• **Calculo de la temperatura en la partición D3 (UNE EN 15377) :**

Teniendo en cuenta que el suelo está en contacto con el terreno la ecuación queda:

$$T_{D3}^n = \frac{\left[\frac{(T_{m,D2}^{n-1} - T_{D3}^{n-1})}{R_{d,D2} + R_{a,D3}} \right] \cdot \Delta t}{C_{t,D3}} + T_{D3}^{n-1} \quad (7.15)$$

Donde:

$T_{m,D2}^{n-1}$, Temperatura media en la partición D2 ($^\circ\text{C}$)

$R_{d,D2}$, Resistencia descendente de la partición D2 ($\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$)

$R_{a,D3}$, Resistencia ascendente de la partición D3 ($\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$)

$C_{t,D3}$, Capacidad térmica de la partición D3 ($\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$)

T_{D3}^{n-1} , Temperatura de la partición D3 en el instante anterior ($^\circ\text{C}$)

7.5 CALCULO DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL SUELO

En el cálculo de la temperatura superficial del suelo debemos tener en cuenta que debe cumplir con la norma UNE EN 1264, en el que la temperatura superficial del suelo no puede superar los 29°C. Se calcula según (7.16):

$$T_{s,sup}^n = q_s^n \cdot \left(\frac{1}{\alpha} + R_{a,D1} \right) + T_{bal}^n \quad (7.16)$$

Donde:

q_s^n , Densidad de flujo térmico en el suelo (W/m²)

$R_{a,D1}$, Resistencia ascendente de la partición D1 (m² °C/W)

T_{bal}^n , Temperatura en el punto medio del espesor de la baldosa, partición D1 (°C)

$\frac{1}{\alpha}$, Resistencia a la transferencia de calor en la superficie del suelo radiante según UNE EN 1264.

7.6 CALCULO DE LA TEMPERATURA DEL AIRE DEL LOCAL

La temperatura de aire interior del local se calcula según (7.17) (UNE EN 15377):

$$T_{aire}^n = \frac{Q_{conv}^n + \frac{A_M}{R_{s,M}} \cdot T_{s,M}^{n-1} + \frac{A_s}{R_{s,sup}} \cdot T_{bal}^{n-1}}{\frac{A_M}{R_{s,M}} + \frac{A_s}{R_{s,sup}}} \quad (7.17)$$

Donde:

T_{aire}^n , Temperatura del aire en el intervalo n (°C)

Q_{conv}^n , Carga de convección en el intervalo n (W)

A_M , Área de muros y techo (m²)

A_s , Área del suelo (m²)

$R_{s,M}$, Resistencia sup. de muros y techo (m² °C/W)

$R_{s,sup}$, Resistencia superficial del suelo (m² °C/W)

$T_{s,M}^{n-1}$, Temperatura superficial del muro en el intervalo anterior (°C)

T_{bal}^{n-1} , Temperatura en el punto medio del espesor de la baldosa en el intervalo anterior (°C)

7.7 SIMULACIÓN

Los datos mostrados en la simulación son para el día más frío de cada mes del periodo de uso calefacción, comprendido entre el 1 de Noviembre y el 30 de Abril, aunque la simulación abarca desde siete días antes hasta el siguiente día. La temperatura exterior es la medida por la estación meteorológica situada en el local, tomada en intervalos de 10 minutos, con lo que se obtienen 144 datos para cada día. La puesta en marcha del sistema de calefacción será a las 8:00h. y la desconexión a las 18:00h, horario de trabajo del personal.

Para el cálculo de la simulación se deben imponer unos valores iniciales a la temperatura del suelo, al aire del ambiente interior y a la temperatura de impulsión y retorno del agua en el circuito. Estos valores son los indicados en las tablas 7.1, 7.2 y 7.5. De acuerdo con la norma, los datos referentes al perfil inicial de temperaturas de suministro de agua y de las temperaturas de las superficies de contacto de las diferentes particiones del suelo, no son decisivas, si la simulación abarca más de un ciclo de funcionamiento, solo influirá en las fases iniciales de la simulación. Por ello la simulación se inicia siete días antes al día de estudio, hasta el día siguiente.

Las condiciones en la que se realiza la simulación son:

- No tendremos en consideración el efecto de la radiación solar en el local, ni las ganancias internas de calor por equipos eléctricos y personas. Tampoco tendremos en cuenta la radiación de calor que se produce entre superficies.
- La temperatura de impulsión del agua será, para todos los días de la simulación, la misma, y constante de 40°C.
- Una vez alcanzada la temperatura de confort de 21°C, se impondrá un rango de $\pm 0,3^\circ\text{C}$. Cuando la temperatura interior supere 21,3°C, el sistema se desconectará hasta que la temperatura descienda de 20,7°C, momento en el que se volverá a conectar el sistema para aumentar la temperatura interior.

Calcularemos la carga térmica total de cada día utilizando las ecuaciones 2.4, 2.5 y 2.6. Y calcularemos el calor transmitido por el suelo (inercia térmica) desde la desconexión el día anterior (18:00h) hasta la conexión del día de estudio (8:00h). Calor que deberá ser aportado por el sistema de calefacción.

Debido al estudio que nos ocupa, los resultados mostrados en las figuras que a continuación se muestran, son los relacionados con el sistema radiante, es decir, la temperatura del ambiente interior, temperatura en el plano de los tubos y temperatura superficial del suelo.

A continuación se expone un ejemplo numérico del método descrito para el 28 de Noviembre desde el momento de la desconexión del sistema a las 18:00 h, para intervalos $\Delta t = 600 \text{ seg}$. Para el resto de cálculos de la simulación se hace uso del programa de cálculo Excel.

Para el cálculo, consideramos $n=0$ (18:00h) como los valores iniciales donde las temperaturas son:

- Temperatura superficial del suelo, $T_{s,sup}^0 = 26,4^\circ\text{C}$
- Temperatura del ambiente interior, $T_{aire}^0 = 21^\circ\text{C}$
- Temperatura de impulsión del agua, $T_{imp}^0 = 40^\circ\text{C}$
- Temperatura exterior a las 18:00 h, $T_{ext} = 8,6^\circ\text{C}$
- Temperatura superficial de los muros, $T_M^0 = 18,2^\circ\text{C}$
- Temperatura de la baldosa (D1): $T_{bal}^0 = 32,5^\circ\text{C}$
- Temperatura a nivel de los tubos, $T_{m,D2}^0 = 35^\circ\text{C}$

A partir de estos datos, que consideramos $n=0$, se muestran los resultados para el intervalo $n=1$:

La temperatura exterior en el intervalo 1 es: $T_{ext} = 8,2^\circ\text{C}$

La temperatura de confort T_i es de 21°C

Q_{Transm}^n , es el flujo calorífico de entrada en el local desde el exterior en el intervalo de tiempo n .

El valor de Q_{Transm}^1 en el instante $n=1$ se calcula haciendo uso de la ecuación 2.4 y los datos que aparecen en la tabla 2.15, así nos queda:

$$Q_{Transm}^1 = \Sigma U \cdot A \cdot (T_{ext} - T_i) = -867,34 \text{ W}$$

Donde $\Sigma U \cdot A$ es igual a $68 \text{ W/}^\circ\text{C}$, según los datos extraídos de la tabla 2.15.

De acuerdo con la norma la potencia de calefacción será <0 al mantenerse una temperatura interior superior a la temperatura exterior. La potencia media de calefacción para el 28 de Noviembre será de -1356 W (Calculada según los datos obtenidos de la figura 7.4 y de la aplicación de las ecuaciones que encontramos en el capítulo 2)

Haciendo uso de la metodología de cálculo descrita en la norma, los resultados son:

- **Cargas que actúan en el interior del local de acuerdo con la norma.**

Según las ecuaciones 7.3 y 7.4 tenemos:

$$Q_{conv}^1 = 0,15 \cdot Q_{Transm}^1 = -130,1 \text{ W}$$

$$Q_{Rad}^1 = 0,85 \cdot Q_{Transm}^1 = -737,2 \text{ W}$$

Donde:

$$Q_{Transm}^1 = -867,34 \text{ W}$$

- **Calculo de la temperatura del aire interior según 7.17.**

$$T_{aire}^1 = \frac{Q_{conv}^1 + \frac{A_M}{R_{s,M}} \cdot T_{s,M}^0 + \frac{A_s}{R_{s,sup}} \cdot T_{bal}^0}{\frac{A_M}{R_{s,M}} + \frac{A_s}{R_{s,sup}}} = \frac{-130,1 + \frac{95}{0,22} \cdot 18 + \frac{24,55}{0,2} \cdot 32,5}{\frac{95}{0,22} + \frac{24,55}{0,2}} = 21,15^\circ\text{C}$$

- **Cargas que actúan sobre las superficies interiores del local**

Cargas debidas al calor por convección según 7.5 y 7.6

- En muros:

$$Q_{convM}^1 = \frac{T_{aire}^1 - T_{s,M}^0}{R_{s,M}} \cdot A_M = \frac{21,15 - 18}{0,22} \cdot 95 = 1360,2 \text{ W}$$

En este instante, debido a que la temperatura exterior es menor que la temperatura interior, los muros transfieren calor al exterior por convección.

- En el suelo

$$Q_{conv,s}^1 = \frac{T_{aire}^1 - T_{bal}^0}{R_{s,sup}} \cdot A_s = \frac{21,15 - 32,5}{0,2} \cdot 24,55 = -1393,2 \text{ W}$$

Debido a que la temperatura del suelo es mayor que la temperatura interior, éste transfiere calor hacia el interior del local.

Cargas debidas al calor por radiación según 7.7 y 7.8

- En muros:

$$Q_{Rad,M}^1 = Q_{Rad}^1 \cdot \frac{A_M}{2 \cdot A_s + A_M} = -479,2 \text{ W}$$

- En el suelo:

$$Q_{Rad,s}^1 = Q_{Rad}^1 \cdot \frac{A_s}{2 \cdot A_s + A_M} = -125,3 \text{ W}$$

Densidad de flujo térmico que actúa en el suelo según 7.9 de acuerdo con la norma:

$$q_s^1 = \frac{Q_{Rad,s}^1 + Q_{conv,s}^1}{A_s} = -62,3 \text{ W/m}^2$$

- **Calculo de la temperatura en el plano de los tubos con el sistema en funcionamiento**

Para el cálculo de la temperatura a nivel de los tubos utilizamos la ecuación 7.13 para el sistema desconectado, quedando:

$$T_{m,D2}^1 = \frac{\left[\left(\frac{T_{bal}^0 - T_{m,D2}^0}{R_{d,D1} + R_{a,D2}} \right) + \left(\frac{T_{D3}^0 - T_{m,D2}^0}{R_{d,D2} + R_{a,D3}} \right) \right] \cdot \Delta t}{C_{t,D2}} + T_{m,D2}^0$$

De acuerdo con la norma, no consideramos la influencia de la partición D3, al ser la última, quedando:

$$T_{m,D2}^1 = \frac{\left[\left(\frac{32,5-35,05}{0,009+0,018} \right) + \left(\frac{-35,05}{0,6} \right) \right] \cdot 600}{72750} + 35,05 = 33,8^\circ\text{C}$$

- **Calculo de la temperatura superficial del suelo**

Inicialmente debemos calcular la temperatura de T_{bal}^1 de la ecuación 7.11

$$T_{bal}^1 = \frac{\left(q_s^1 + \frac{T_{m,D2}^0 - T_{bal}^0}{R_{d,D1} + R_{a,D2}} \right) \cdot \Delta t}{C_{t,bal}} + T_{bal}^0 = \frac{\left(-111,7 + \frac{35,05-32,5}{0,009+0,018} \right) \cdot 600}{25000} + 32,5 = 33,2^\circ\text{C}$$

Y la temperatura superficial del suelo, $T_{s,sup}^1$ según la ecuación 7.16:

$$T_{s,sup}^1 = q_s^1 \cdot \left(\frac{1}{\alpha} + R_{a,D1} \right) + T_{bal}^1 = -62,3 \cdot (0,0926 + 0,009) + 33,2 = 26,9^\circ\text{C}$$

De los resultados obtenidos para el primer intervalo podemos observar, una vez que se desconecta el sistema, como la temperatura a nivel de los tubos desciende $1,25^\circ\text{C}$, sin embargo, tanto la temperatura interior, como la temperatura superficial del suelo, aumentan levemente. Esto se mantiene pocos minutos después, momento a partir del cual comienzan a descender progresivamente, tendiendo a la temperatura de equilibrio, hasta la conexión del sistema al día siguiente. Todo ello se puede observar en la figura 7.6.

7.7.1 NOVIEMBRE

Las temperaturas medias diarias del mes de Noviembre de 2011 han sido superiores a sus valores normales, resultando un mes cálido. Registrando una temperatura máxima de 21,7°C el día 12 y una temperatura mínima de 0,52°C el día 28.

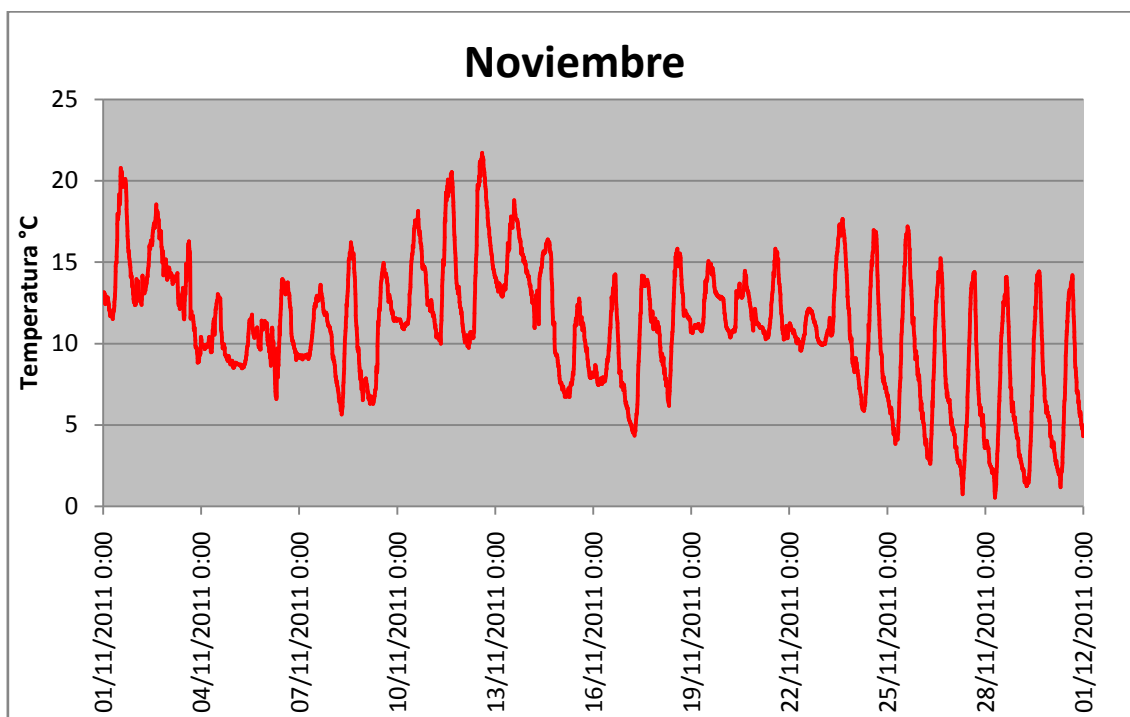


Figura 7.3. Evolución de la temperatura exterior en el mes de Noviembre

En la figura 7.4 se representa la evolución de la temperatura para el día más frío del mes, el 28 de Noviembre.

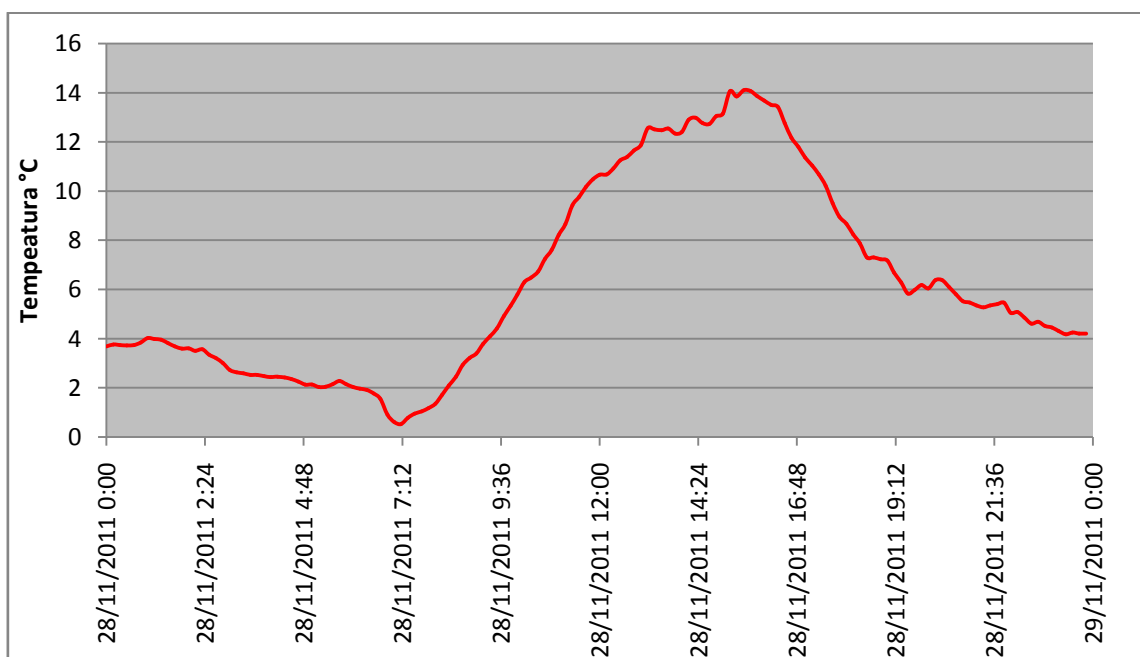


Figura 7.4. Evolución de la temperatura exterior para el día 28/11/2011

- La temperatura mínima se registra a las 7:10 h. con 0,52°C.
 - La temperatura máxima a las 15:30 h. con 14,1°C.
 - La temperatura media es de 6,3°C.
- **Carga térmica y demanda de calefacción para el periodo de conexión.**

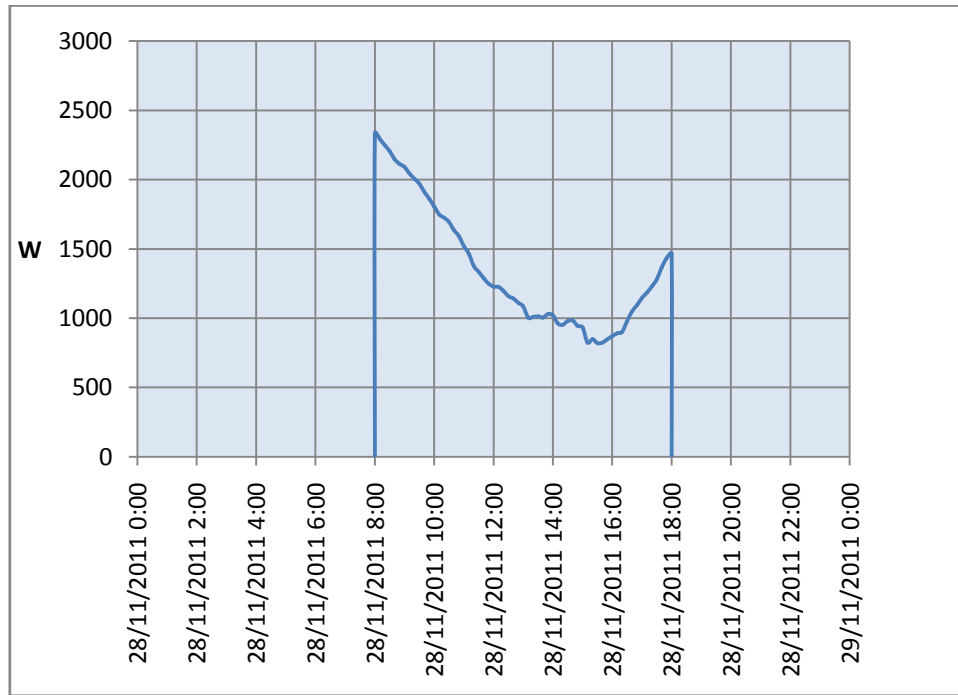


Figura 7.5. Carga térmica de calefacción para el periodo de conexión del 28 de Noviembre.

La carga máxima se produce en la conexión (8:00 horas) con un valor de 2335 W. La carga mínima se produce a las 15:30 horas con 820 W. La demanda térmica media de calefacción será de 13,56 kWh. La potencia media de calefacción será de 1356 W.

- **Evolución de temperaturas para el 28 de Noviembre**

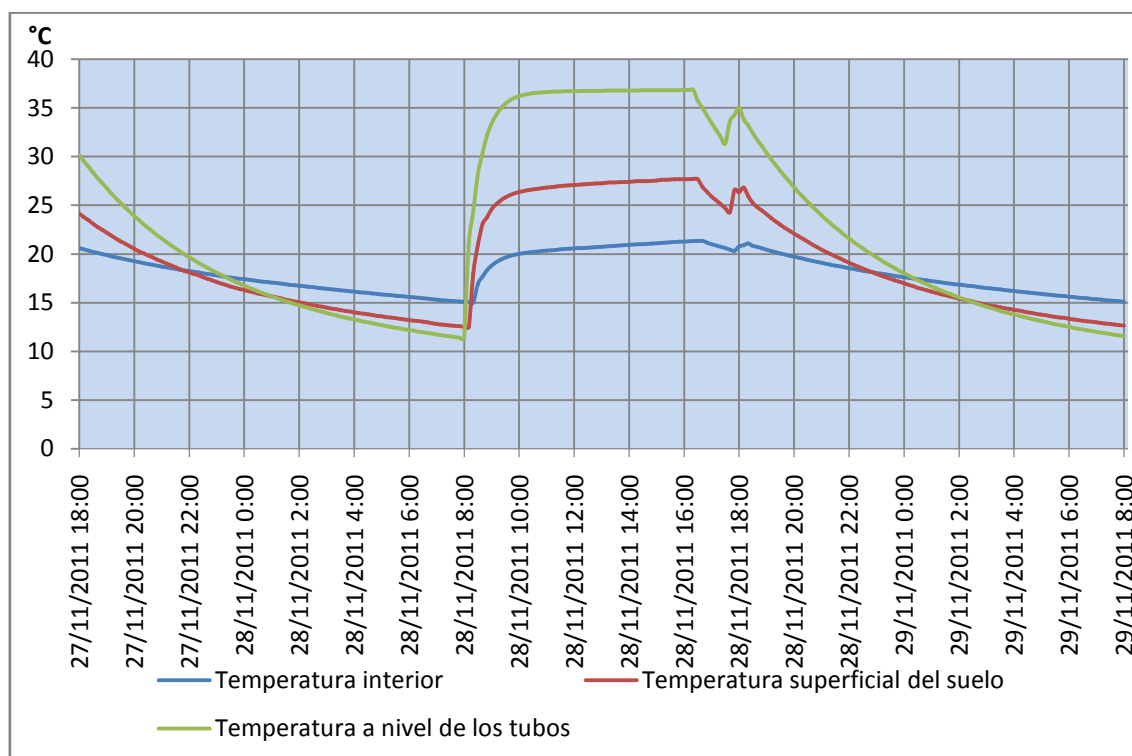


Figura 7.6. Comportamiento del suelo en el mes de Noviembre

Tras la desconexión del sistema radiante el día anterior, la temperatura interior, la temperatura superficial del suelo y la temperatura a nivel de los tubos, descienden progresivamente hasta alcanzar su valor mínimo a las 8:00h, instante en el que se conecta el sistema de calefacción siendo 15,06°C, 12,5°C y 11,3°C, respectivamente, sus temperaturas.

La temperatura a nivel de los tubos asciende rápidamente desde el momento que se conecta el sistema, hasta alcanzar 36,7°C a las 11:40h, ésta se mantendrá constante hasta que la temperatura interior supere 21,3°C, es entonces cuando el sistema se desconecta para reducir la temperatura a nivel de los tubos y con ello también la interior. Así, el sistema se desconecta a las 16:20h, es entonces cuando la temperatura a nivel de los tubos comienza a descender de forma lineal hasta que la temperatura interior se sitúa por debajo de 20,7°C, instante en que el sistema se vuelve a conectar (17:30h) para aumentar de nuevo la temperatura interior. En la figura 7.7 se muestra, gráficamente, este proceso, que inicialmente describe un pronunciado aumento y moderado después. La temperatura aumenta hasta las 18:00h, cuando se desconecta el sistema, descendiendo hasta 11,55°C, siendo ésta la temperatura a nivel de los tubos en el momento de la conexión al día siguiente.

La temperatura de la superficie del suelo no comienza a elevarse hasta las 8:20h, incrementándose rápidamente hasta 26,35°C a las 10:00h. Ésta continúa subiendo lentamente hasta el momento en que el sistema se desconecta a las 16:20h, en este instante, la temperatura superficial es de 27,7°C, dicha temperatura desciende de forma casi lineal hasta

la conexión del sistema a las 17:30h, llegando hasta 24,5°C, momento en el que el calentamiento de la superficie del suelo describe la misma curva que la temperatura a nivel de los tubos, es decir, un incremento pronunciado al principio y moderado después, hasta la desconexión del sistema.

En la desconexión a las 18:00h, la temperatura alcanza 26,3°C, y se mantiene durante unos minutos. Pasado este tiempo, la superficie del suelo comienza a perder temperatura. Inicialmente la caída es más rápida, tendiendo al equilibrio con la temperatura a nivel de los tubos, hasta 12,6°C, que será la temperatura superficial del suelo en la conexión del sistema al día siguiente.

La temperatura interior comienza a elevarse poco después de que lo haga la superficie del suelo dibujando la misma curva que ésta. Ascende rápidamente hasta 20°C a las 10:00h y alcanza la temperatura de confort de 21°C a las 14:30h, continúa ascendiendo hasta que supera 21,3°C a las 16:30h, momento en el que se desconecta el sistema y, por lo tanto, comienza a descender. Cuando la temperatura se sitúa por debajo de 20,7°C (17:30h) el sistema se conecta de nuevo para aumentarla.

En el momento de la desconexión a las 18:00h la temperatura interior es de 21°C, aumentará levemente hasta 21,2°C a las 18:20h, momento en el que comienza a bajar lentamente hasta los 15,1°C, siendo ésta la temperatura interior en la conexión del sistema al día siguiente.

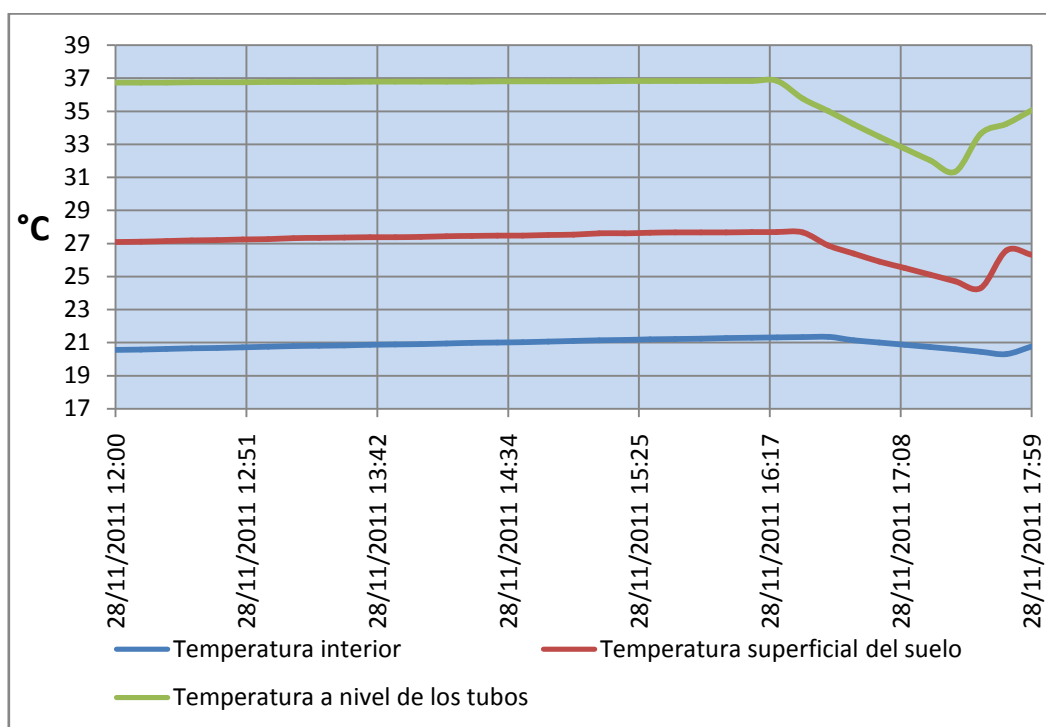


Figura 7.7. Evolución de las temperaturas en la desconexión y conexión.

- **Calor transmitido por el suelo en el periodo de desconexión.**

El calor transmitido por el suelo en el periodo de desconexión del sistema, desde el desconectado el día anterior (27 de Noviembre) a las 18:00h hasta la conexión a las 8:00h lo calculamos con la expresión:

$$Q_t = \Sigma(\rho \cdot V \cdot C_p) \cdot (T_f - T_{ic})$$

Donde:

T_f , Temperatura superficial del suelo a las 18:00h, 24,15°C.

T_{ic} , Temperatura superficial del suelo a las 8:00h del día siguiente, 12,5°C.

$\Sigma(\rho \cdot V \cdot C_p)$, Sumatorio del producto de las propiedades físicas de los materiales situados por encima del nivel de los tubos.

COMPOSICION	V (m³)	ρ (Kg/m³)	C_p (J/KgK)
Hormigón	0,73	2400	1000
Baldosa	0,5	2000	1250

Tabla 7.6. Propiedades de los materiales situados por encima de los tubos.

Donde:

$$\Sigma(\rho \cdot V \cdot C_p) = 3002 \text{ kJ/K} = 833,8 \text{ kWh/K}$$

El calor total transmitido es:

$$Q_t = 833,8 \cdot (24,15 - 12,5) = 9,7 \text{ kWh}$$

Este calor perdido durante el periodo de desconexión deberá ser aportado por el sistema de calefacción al día siguiente.

- **Calor transmitido al suelo Q_g**

El calor transmitido al suelo por el sistema radiante será función del incremento de temperatura máximo que experimenta el suelo durante el periodo de conexión de la calefacción, quedando:

$$Q_g = \Sigma(\rho \cdot V \cdot C_p) \cdot (T_f - T_i) = 833,8 \cdot (26,5 - 12,5) = 11,67 \text{ kWh}$$

Donde:

T_f , Temperatura superficial del suelo a las 18:00h

T_i , Temperatura superficial del suelo a las 8:00h

7.7.2 DICIEMBRE

Las temperaturas en el mes de diciembre han tenido un comportamiento normal. Registrando una temperatura máxima el día 6 de 15,7°C y la mínima el día 28 de -2,9°C.

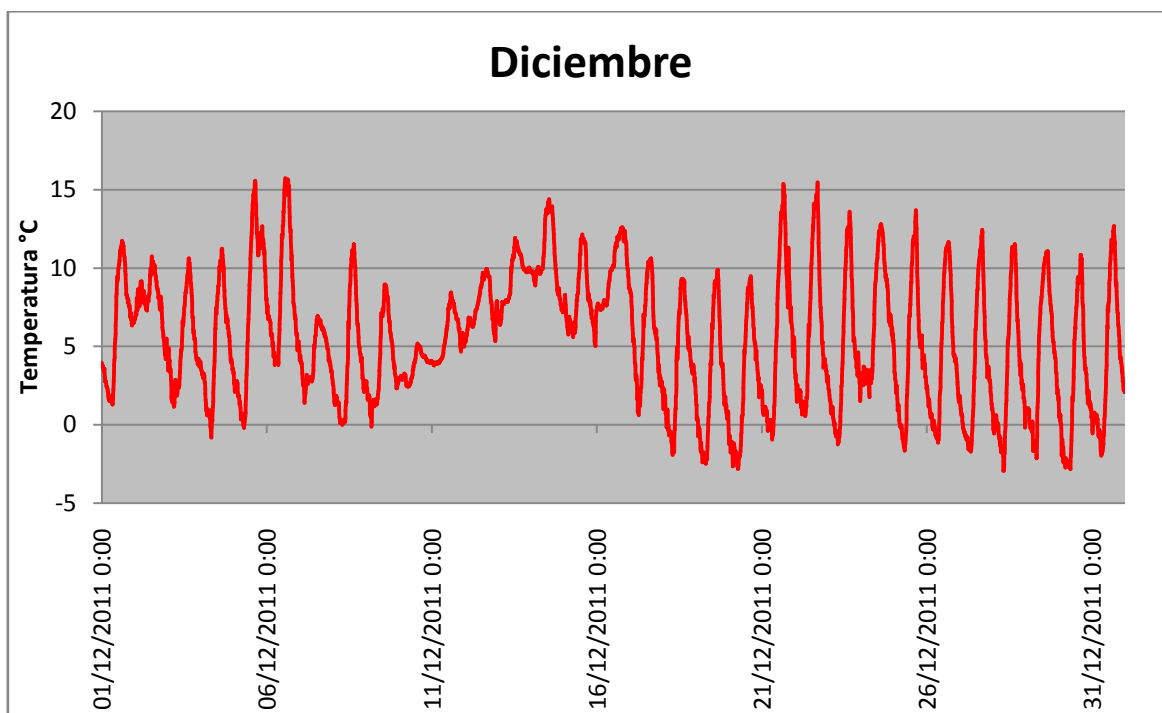


Figura 7.8. Evolución de la temperatura exterior en el mes de diciembre.

En la figura 7.9 se representa la evolución de la temperatura para el día más frío del mes, el 28 de Diciembre.

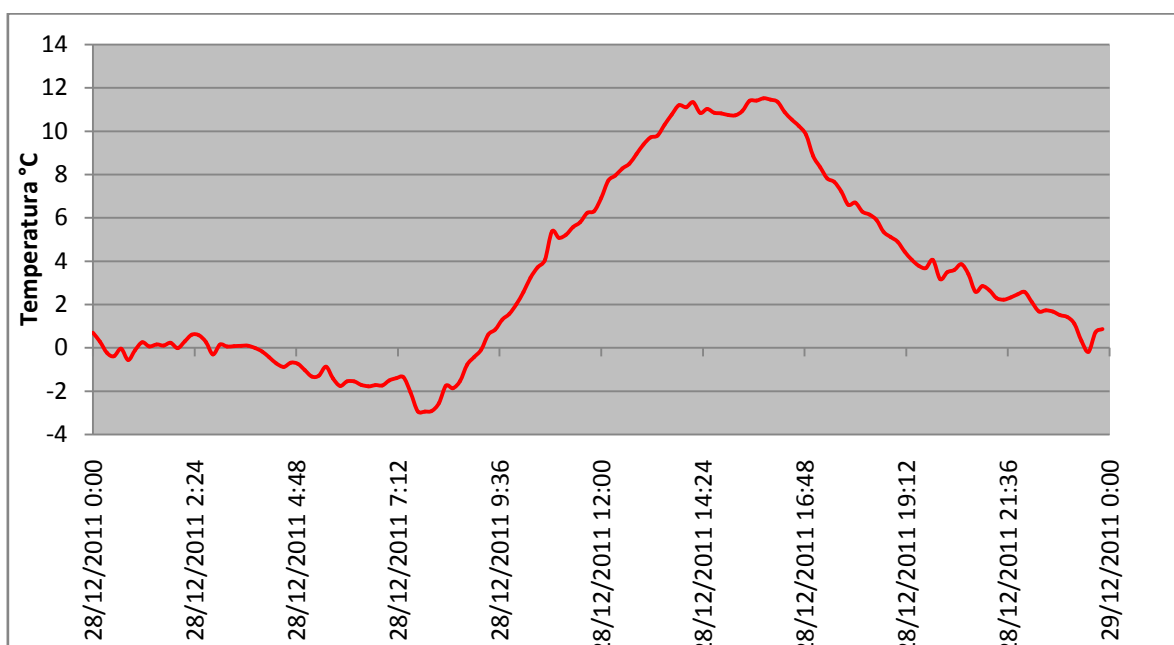


Figura 7.9. Evolución de la temperatura exterior para el día 28/12/2011

- La temperatura mínima se registra a las 7:50 h. con $-2,95^{\circ}\text{C}$
- La temperatura máxima a las 15:50 h. con $11,5^{\circ}\text{C}$.
- La temperatura media es de $3,3^{\circ}\text{C}$.

- **Carga térmica y demanda de calefacción para el periodo de conexión**

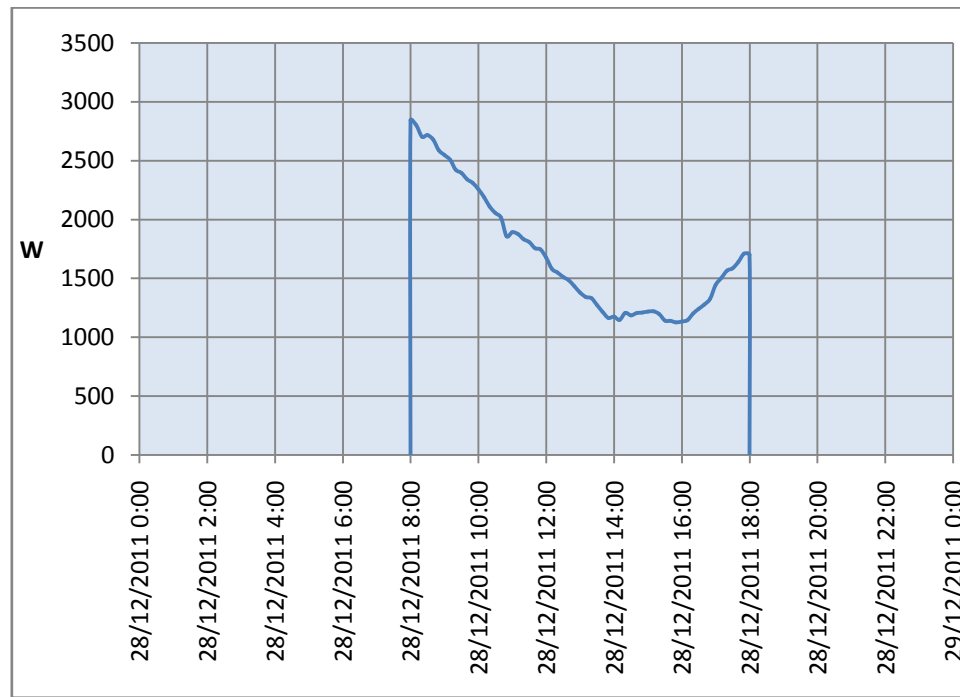


Figura 7.10. Carga térmica de calefacción para el periodo de conexión del 28 de Diciembre.

La carga máxima se produce a las 8:00 horas con 2842,2 W y la mínima a las 15:50 horas con 1126,2 W. La demanda térmica media de calefacción será de 17 kWh.

- **Evolución de temperaturas para el 28 de Diciembre**

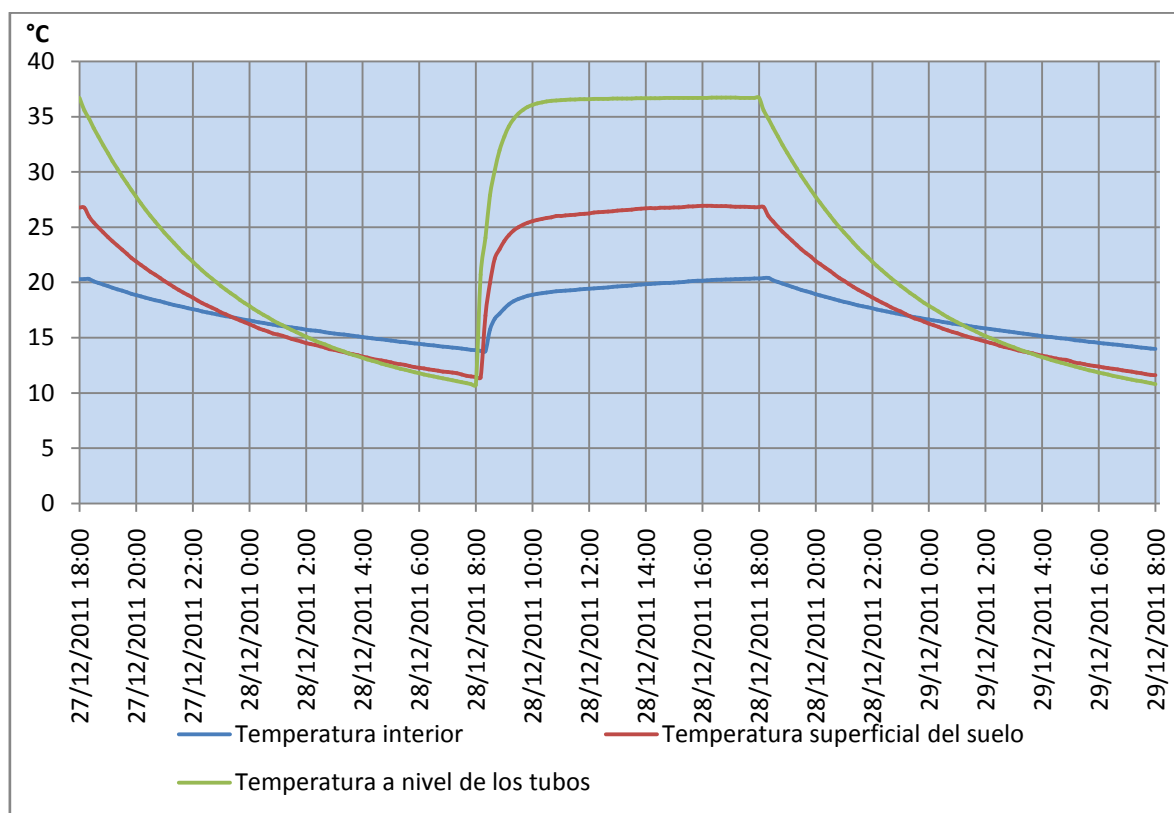


Figura 7.11. Comportamiento del suelo en el mes de Diciembre

Tras la desconexión del sistema radiante el día anterior, la temperatura interior, la temperatura superficial del suelo y la temperatura a nivel de los tubos, descienden progresivamente hasta alcanzar su valor mínimo a las 8:00h, instante en el que se conecta el sistema de calefacción siendo 13,8°C, 11,4°C y 10,75°C, respectivamente, sus temperaturas.

La temperatura a nivel de los tubos asciende rápidamente desde el momento que se conecta el sistema, hasta alcanzar 36°C, aproximadamente, a las 10:00h, desde este instante la temperatura se mantendrá prácticamente constante hasta el momento de la desconexión, registrando una temperatura, a las 18:00h, de 36,7°C. Desde la desconexión del sistema, la temperatura a nivel de los tubos descenderá rápidamente, hasta 10,8°C, momento de la conexión al día siguiente.

La temperatura de la superficie del suelo no comienza a elevarse hasta las 8:20h, produciéndose un incremento notable llegando hasta 26°C a las 10:50h, desde este instante y hasta la desconexión del sistema, la temperatura asciende progresivamente hasta 26,8°C, y ésta se mantendrá minutos después de la desconexión. A partir de ese momento, la superficie del suelo comienza a perder temperatura. Inicialmente, el descenso es más acusado y, con el paso del tiempo, modera su descenso hasta 11,6°C, temperatura superficial del suelo en la conexión del sistema al día siguiente.

La temperatura interior comienza a elevarse poco después de que lo haga la superficie del suelo, dibujando una curva semejante a ésta. Ascende rápidamente hasta 19°C a las 10:00h y, desde este instante, hasta el momento de la desconexión, de forma lineal hasta 20,3°C. En este día, el sistema no consigue elevar la temperatura interior hasta la de confort, 21°C, esto es debido a que nos situamos en la posición más desfavorable, donde desestimamos la aportación de la radiación solar y de aparatos eléctricos y de personas en el interior, además de considerar la temperatura de impulsión del agua constante. Desde la desconexión del sistema, la temperatura descenderá hasta 13,9°C, cuando se conecta el sistema al día siguiente.

- **Calor transmitido por el suelo en el periodo de desconexión.**

El calor transmitido por el suelo en el periodo de desconexión del sistema, desde el desconectado el día anterior (27 de Diciembre) a las 18:00h hasta la conexión a las 8:00h lo calculamos con la expresión:

$$Q_t = \Sigma(\rho \cdot V \cdot C_p) \cdot (T_f - T_{ic})$$

Donde:

T_f , Temperatura superficial del suelo a las 18:00h, 26,7 °C.

T_{ic} , Temperatura superficial del suelo a las 8:00h del día siguiente, 11,4°C.

$\Sigma(\rho \cdot V \cdot C_p)$, Sumatorio del producto de las propiedades físicas de los materiales situados por encima del nivel de los tubos de la Tabla 7.6

$$Q_t = 833,8 \cdot (26,7 - 11,4) = 12,75 \text{ kWh}$$

Este calor perdido durante el periodo de desconexión deberá ser aportado por el sistema de calefacción al día siguiente.

- **Calor transmitido al suelo Q_g**

El calor transmitido al suelo por el sistema radiante será función del incremento de temperatura máximo que experimenta el suelo durante el periodo de conexión de la calefacción, quedando:

$$Q_g = \Sigma(\rho \cdot V \cdot C_p) \cdot (T_f - T_i) = 833,8 \cdot (26,8 - 11,4) = 12,84 \text{ kWh}$$

Donde:

T_f , Temperatura superficial del suelo a las 18:00h

T_i , Temperatura superficial del suelo a las 8:00h

7.7.3 ENERO

Este mes ha sido, en promedio de temperaturas, cálido o muy cálido, registrando una temperatura media de 6,7°C. La temperatura máxima se registro el día 21 con 15,8°C y mínima de 3,3°C el día 14.

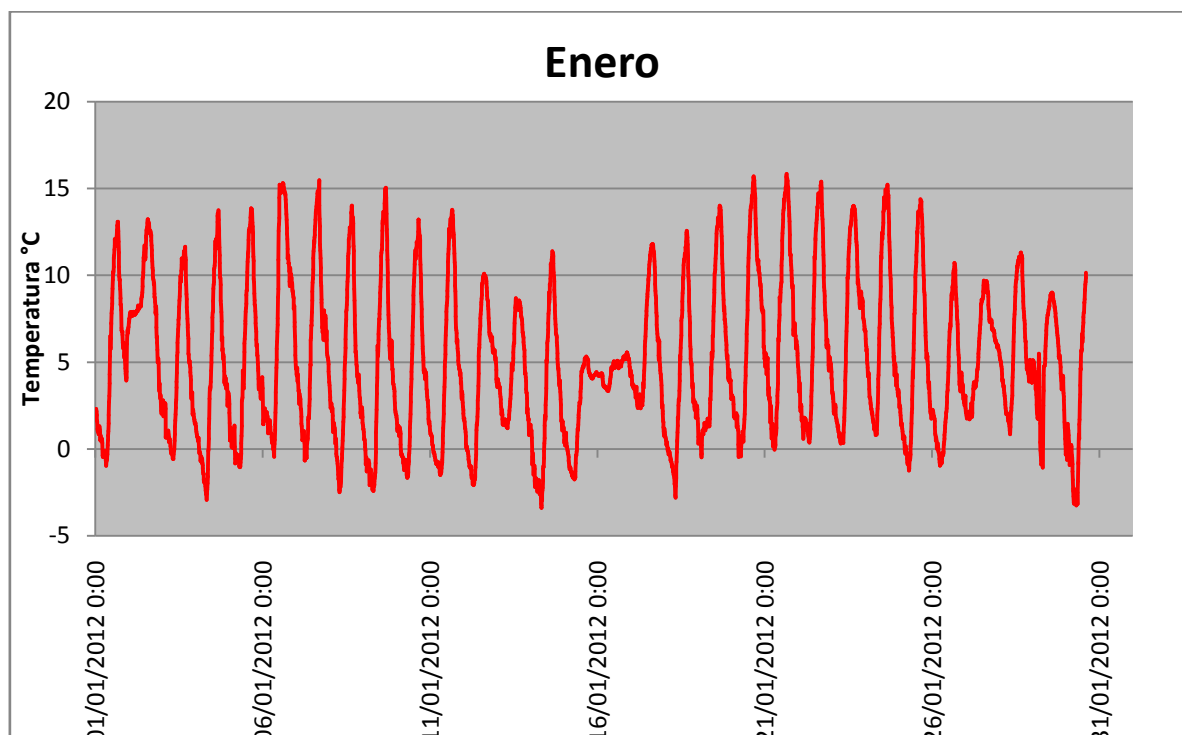


Figura 7.12. Evolución de la temperatura exterior en el mes de Enero

En la figura 7.13 se representa la evolución de la temperatura para el día más frío del mes, el 14 de Enero.

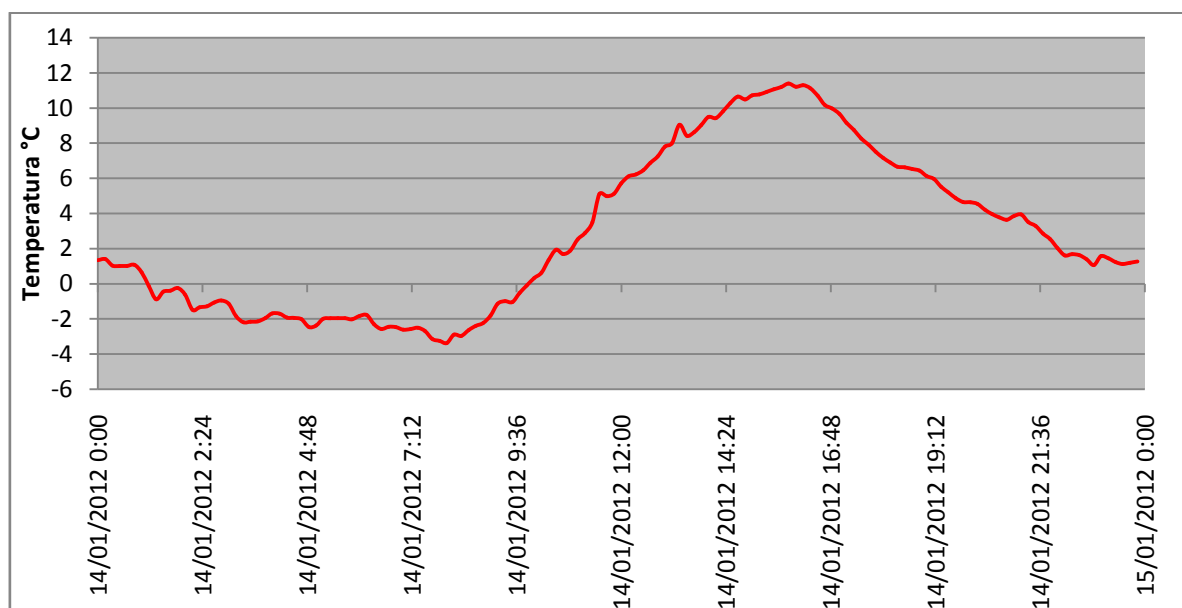


Figura 7.13. Evolución de la temperatura exterior para el día 14/01/2012

- La temperatura mínima se registra a las 8:00 h. con $-3,3^{\circ}\text{C}$
- la temperatura máxima a las 15:50 h. con $11,38^{\circ}\text{C}$.
- La temperatura media es de $2,8^{\circ}\text{C}$.

- **Carga térmica y demanda de calefacción para el periodo de conexión**

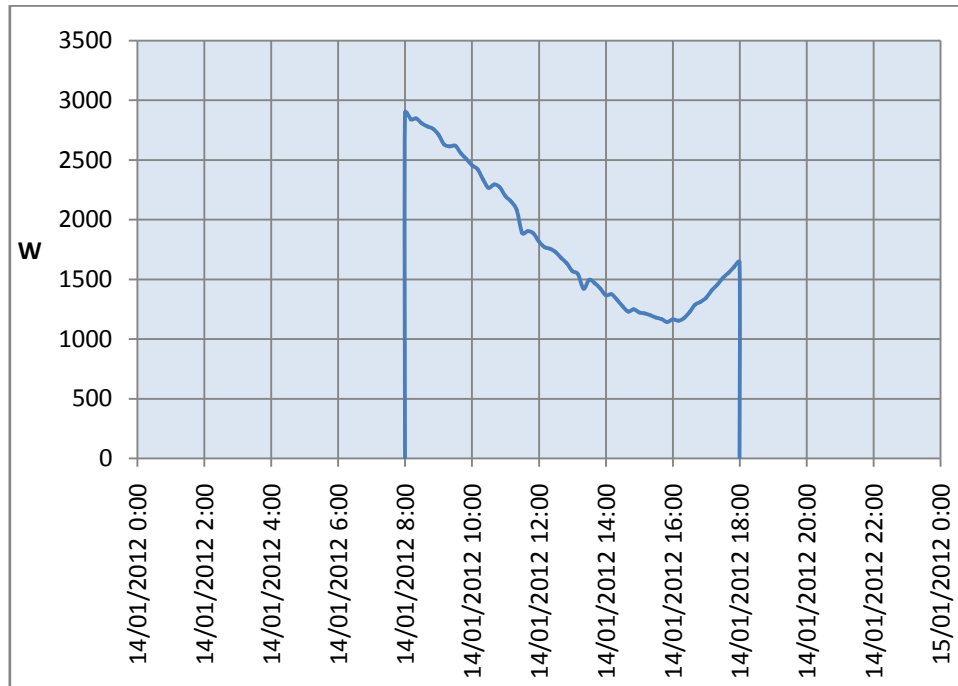


Figura 7.14. Carga térmica de calefacción para el periodo de conexión del 14 de Enero

La carga máxima se produce a las 8:00 horas con 2896 W y la mínima a las 15:50 horas con 1142 W. La demanda térmica media de calefacción será de 18,6 kWh.

- **Evolución de temperaturas para el 14 de Enero**

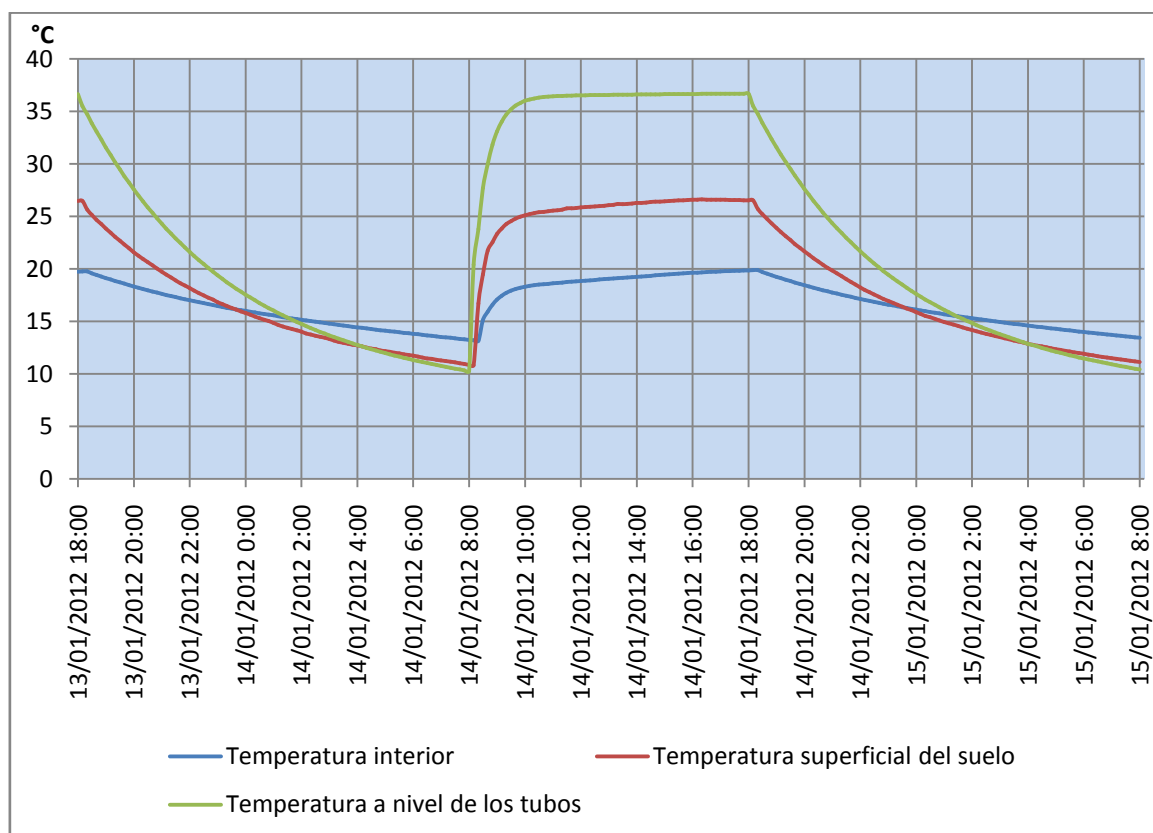


Figura 7.15. Comportamiento del suelo en el mes de Enero

Tras la desconexión del sistema radiante el día anterior, la temperatura interior, la temperatura superficial del suelo y la temperatura a nivel de los tubos, descienden progresivamente hasta alcanzar su valor mínimo a las 8:00h, instante en el que se conecta el sistema de calefacción siendo 13,2°C, 10,8°C y 10,2°C, respectivamente, sus temperaturas.

La temperatura a nivel de los tubos asciende rápidamente desde el momento que se conecta el sistema, hasta alcanzar 36°C, aproximadamente, a las 10:00h, desde este instante la temperatura se mantendrá prácticamente constante hasta el momento de la desconexión, registrando una temperatura, a las 18:00h, de 36,6°C. Desde la desconexión del sistema, la temperatura a nivel de los tubos descenderá rápidamente, hasta 10,4 °C, momento de la conexión al día siguiente.

La temperatura de la superficie del suelo no comienza a elevarse hasta las 8:20h, produciéndose un incremento notable llegando hasta 25°C a las 10:00h, desde este instante y hasta la desconexión del sistema, la temperatura asciende linealmente hasta 26,5°C, y ésta se mantendrá unos minutos después de la desconexión. A partir de ese momento, la superficie del suelo comienza a perder temperatura, siendo el descenso más acusado al principio y, a lo largo del tiempo, un descenso moderado hasta 11,1°C, temperatura superficial del suelo en la conexión del sistema al día siguiente.

La temperatura interior comienza a elevarse poco después de que lo haga la superficie del suelo, dibujando una curva semejante a ésta. Ascende rápidamente hasta 18,3°C a las 10:00h y, desde este instante, de forma lineal hasta 19,8°C en el momento de la desconexión. En este día, el sistema no consigue elevar la temperatura interior hasta la de confort, 21°C, esto es debido a que se desestima la aportación de la radiación solar y de aparatos eléctricos y de personas en el interior, además de considerar la temperatura de impulsión del agua constante, para situarnos en la posición más desfavorable. Desde la desconexión del sistema, la temperatura descenderá hasta 13,4°C, cuando se conecta el sistema al día siguiente.

- **Calor transmitido por el suelo en el periodo de desconexión.**

El calor transmitido por el suelo en el periodo de desconexión del sistema, desde el desconectado el día anterior (13 de Enero) a las 18:00h hasta la conexión a las 8:00h lo calculamos con la expresión:

$$Q_t = \Sigma(\rho \cdot V \cdot C_p) \cdot (T_f - T_{ic})$$

Donde:

T_f , Temperatura superficial del suelo a las 18:00h, 26,4 °C.

T_{ic} , Temperatura superficial del suelo a las 8:00h del día siguiente, 10,8°C.

$\Sigma(\rho \cdot V \cdot C_p)$, Sumatorio del producto de las propiedades físicas de los materiales situados por encima del nivel de los tubos de la tabla 7.6.

$$Q_t = 833,8 \cdot (26,4 - 10,8) = 13 \text{ kWh}$$

Este calor perdido durante el periodo de desconexión deberá ser aportado por el sistema de calefacción al día siguiente.

- **Calor transmitido al suelo Q_g**

El calor transmitido al suelo por el sistema radiante será función del incremento de temperatura máximo que experimenta el suelo durante el periodo de conexión de la calefacción, quedando:

$$Q_g = \Sigma(\rho \cdot V \cdot C_p) \cdot (T_f - T_i) = 833,8 \cdot (26,6 - 10,8) = 13,17 \text{ kWh}$$

Donde:

T_f , Temperatura superficial del suelo a las 18:00h

T_i , Temperatura superficial del suelo a las 8:00h

7.7.4 FEBRERO

Este mes ha sido, en su conjunto, de temperaturas frías, con una temperatura media de 6,2°C. La temperatura máxima se registro el día 26 con 22,14°C y mínima de -8,5°C el día 12.

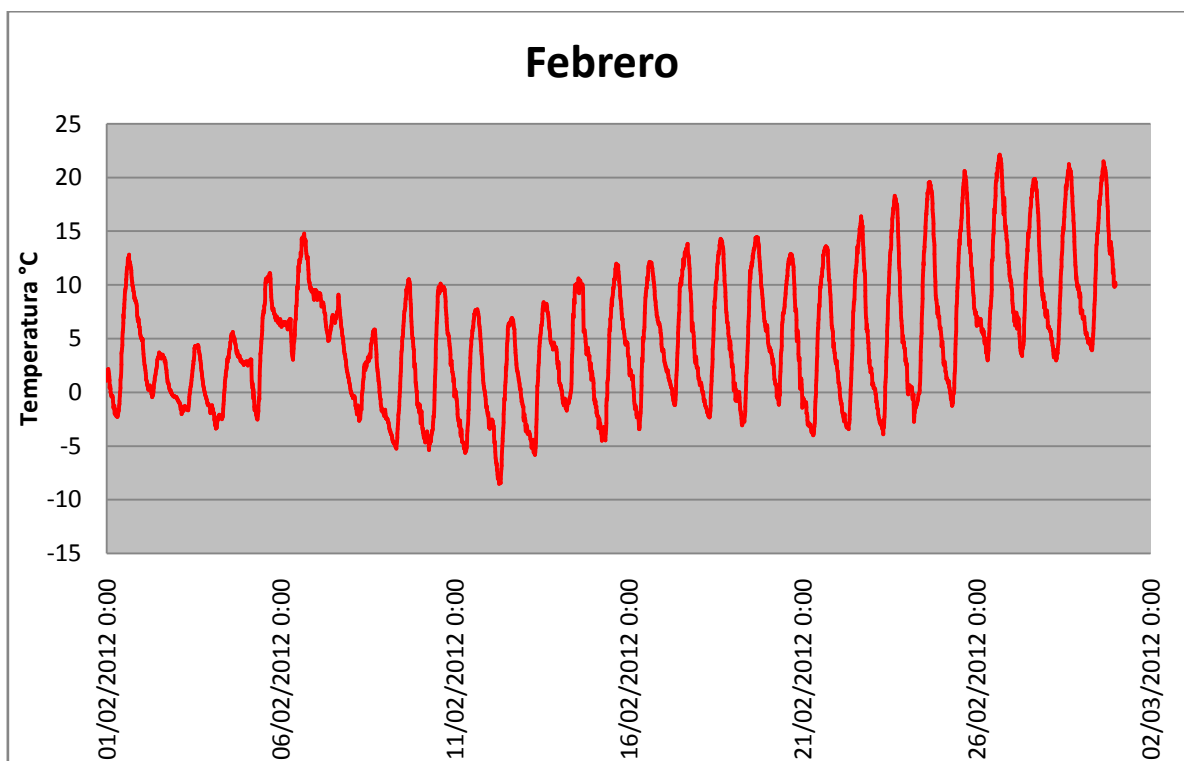


Figura 7.16. Evolución de la temperatura exterior en el mes de Febrero

En la figura 7.17 se representa la evolución de la temperatura para el día más frío del mes, el 12 de Febrero.

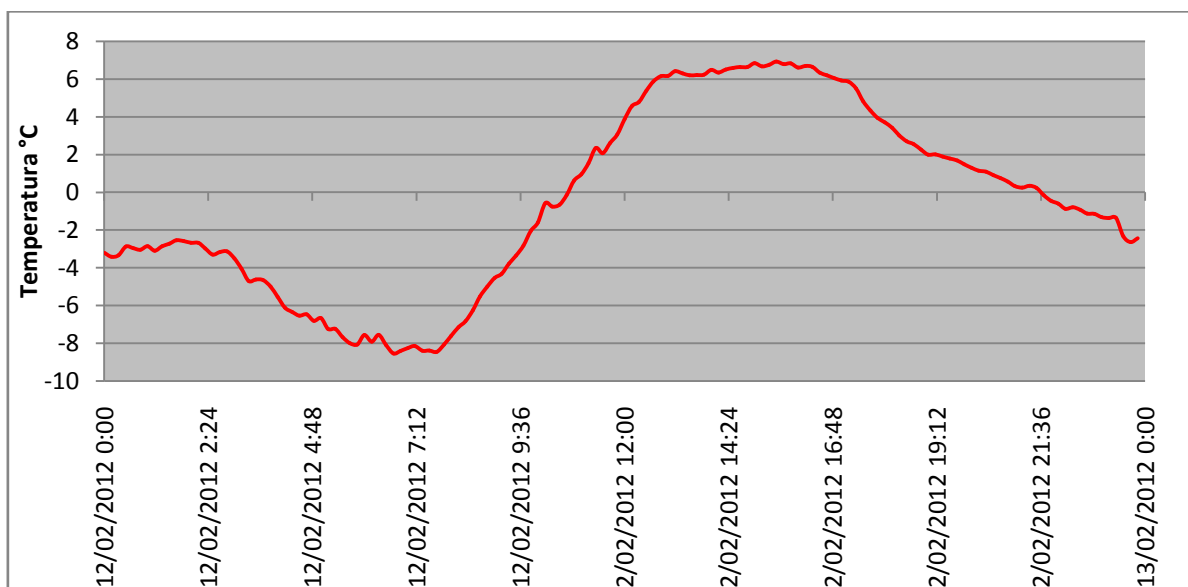


Figura 7.17. Evolución de la temperatura exterior para el día 12/02/2012

- La temperatura mínima se registra a las 6:40 h. con $-8,5^{\circ}\text{C}$
- La temperatura máxima a las 15:30 h. con $6,9^{\circ}\text{C}$.
- La temperatura media es de $-0,5^{\circ}\text{C}$.

- **Carga térmica y demanda de calefacción para el periodo de conexión**

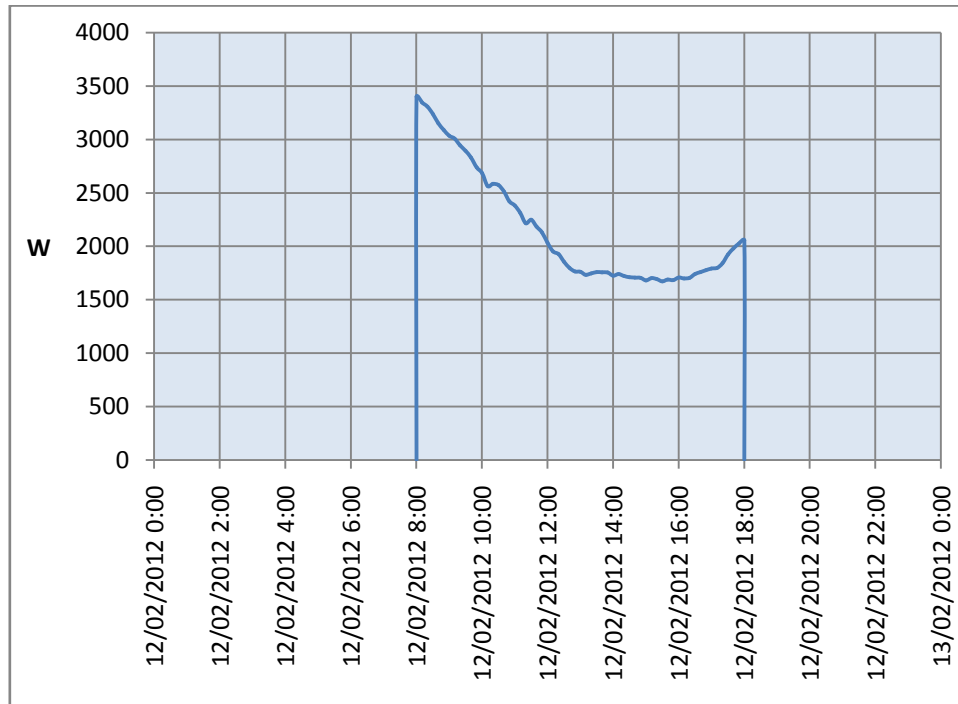


Figura 7.18. Carga térmica de calefacción para el periodo de conexión del 12 de Febrero.

La carga máxima se produce a las 8:00 horas con 3400 W y la mínima a las 15:30 horas con 1672 W. La demanda térmica media de calefacción será de 21,6 kWh.

- **Evolución de temperaturas para el 12 de Febrero**

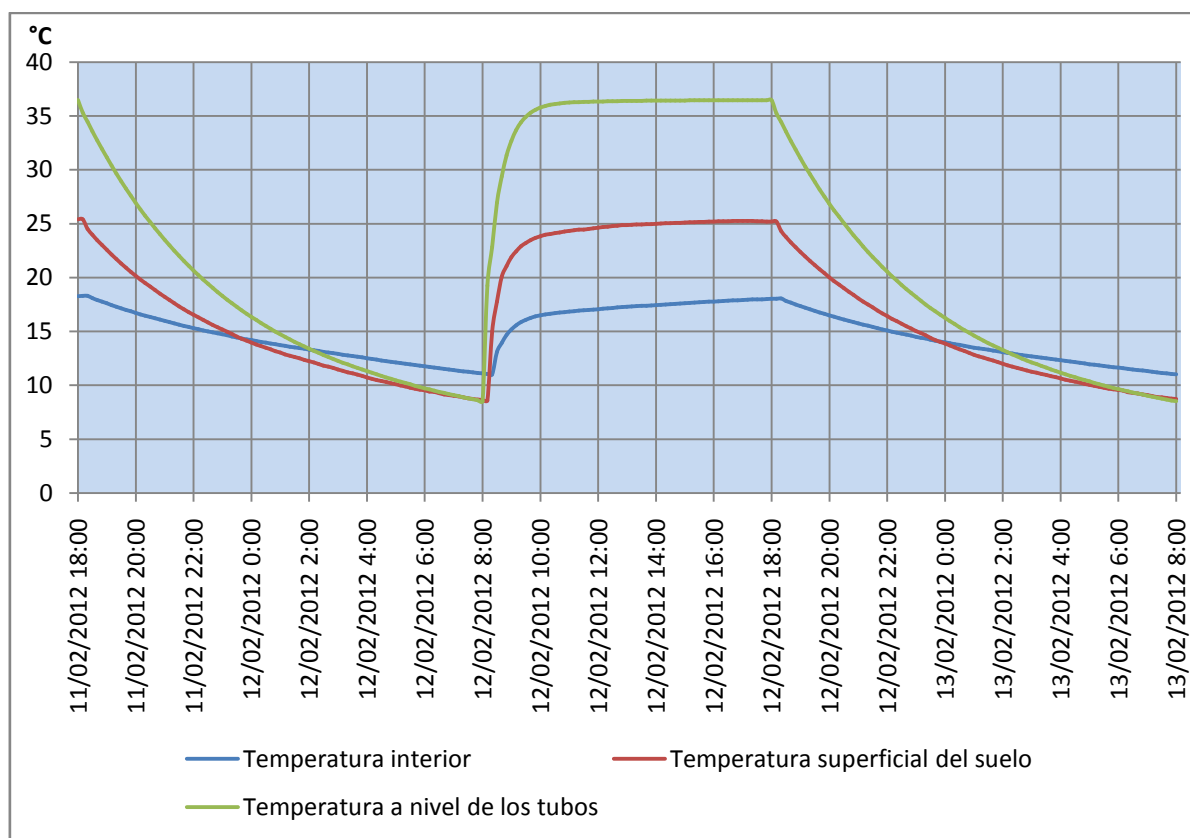


Figura 7.19. Comportamiento del suelo en el mes de Febrero

Tras la desconexión del sistema radiante el día anterior, la temperatura interior, la temperatura superficial del suelo y la temperatura a nivel de los tubos, descienden progresivamente hasta alcanzar su valor mínimo a las 8:00h, instante en el que se conecta el sistema de calefacción siendo 11,1°C, 8,6°C y 8,5°C, respectivamente, sus temperaturas.

La temperatura a nivel de los tubos asciende rápidamente desde el momento que se conecta el sistema, hasta alcanzar 36°C, aproximadamente, a las 10:20h, desde este instante la temperatura se mantendrá prácticamente constante hasta el momento de la desconexión, registrando una temperatura, a las 18:00h, de 36,4°C. Desde la desconexión del sistema, la temperatura a nivel de los tubos descenderá rápidamente, hasta 8,5°C, momento de la conexión al día siguiente.

La temperatura de la superficie del suelo no comienza a elevarse hasta las 8:20h, produciéndose un incremento notable llegando hasta 24°C a las 10:20h, desde este instante y hasta la desconexión del sistema, la temperatura asciende linealmente hasta 25,2°C, y se mantiene minutos después de la desconexión. A partir de ese momento, la superficie del suelo comienza a perder temperatura, siendo el descenso más acusado al principio y, a lo largo del tiempo, un descenso moderado hasta 8,7°C, temperatura superficial del suelo en la conexión del sistema al día siguiente.

La temperatura interior comienza a elevarse poco después de que lo haga la superficie del suelo, dibujando una curva semejante a ésta. Ascende rápidamente hasta 16,4°C a las 9:50h y, desde este instante, de forma lineal hasta 18°C en el momento de la desconexión. En este día, el sistema no consigue elevar la temperatura interior hasta la de confort, 21°C, esto es debido a que se desestima la aportación de la radiación solar y de aparatos eléctricos y de personas en el interior, además de considerar la temperatura de impulsión del agua constante, para situarnos en la posición más desfavorable. Desde la desconexión del sistema, la temperatura descenderá hasta 11,03°C, cuando se conecta el sistema al día siguiente.

- **Calor transmitido por el suelo en el periodo de desconexión.**

El calor transmitido por el suelo en el periodo de desconexión del sistema, desde el desconectado el día anterior (11 de Febrero) a las 18:00h hasta la conexión a las 8:00h lo calculamos con la expresión:

$$Q_t = \Sigma(\rho \cdot V \cdot C_p) \cdot (T_f - T_{ic})$$

Donde:

T_f , Temperatura superficial del suelo a las 18:00h, 25,4 °C.

T_{ic} , Temperatura superficial del suelo a las 8:00h del día siguiente, 8,6°C.

$\Sigma(\rho \cdot V \cdot C_p)$, Sumatorio del producto de las propiedades físicas de los materiales situados por encima del nivel de los tubos de la Tabla 7.6.

$$Q_t = 833,8 \cdot (25,4 - 8,6) = 14 \text{ kWh}$$

Este calor perdido durante el periodo de desconexión deberá ser aportado por el sistema de calefacción al día siguiente.

- **Calor transmitido al suelo Q_g**

El calor transmitido al suelo por el sistema radiante será función del incremento de temperatura máximo que experimenta el suelo durante el periodo de conexión de la calefacción, quedando:

$$Q_g = \Sigma(\rho \cdot V \cdot C_p) \cdot (T_f - T_i) = 833,8 \cdot (25,27 - 8,6) = 13,9 \text{ kWh}$$

Donde:

T_f , Temperatura superficial del suelo a las 18:00h

T_i , Temperatura superficial del suelo a las 8:00h

7.7.5 MARZO

Las temperaturas en el mes han estado en sus valores normales. La temperatura máxima se registro el día 14 con 26°C y mínima de -1,5°C el día 8.

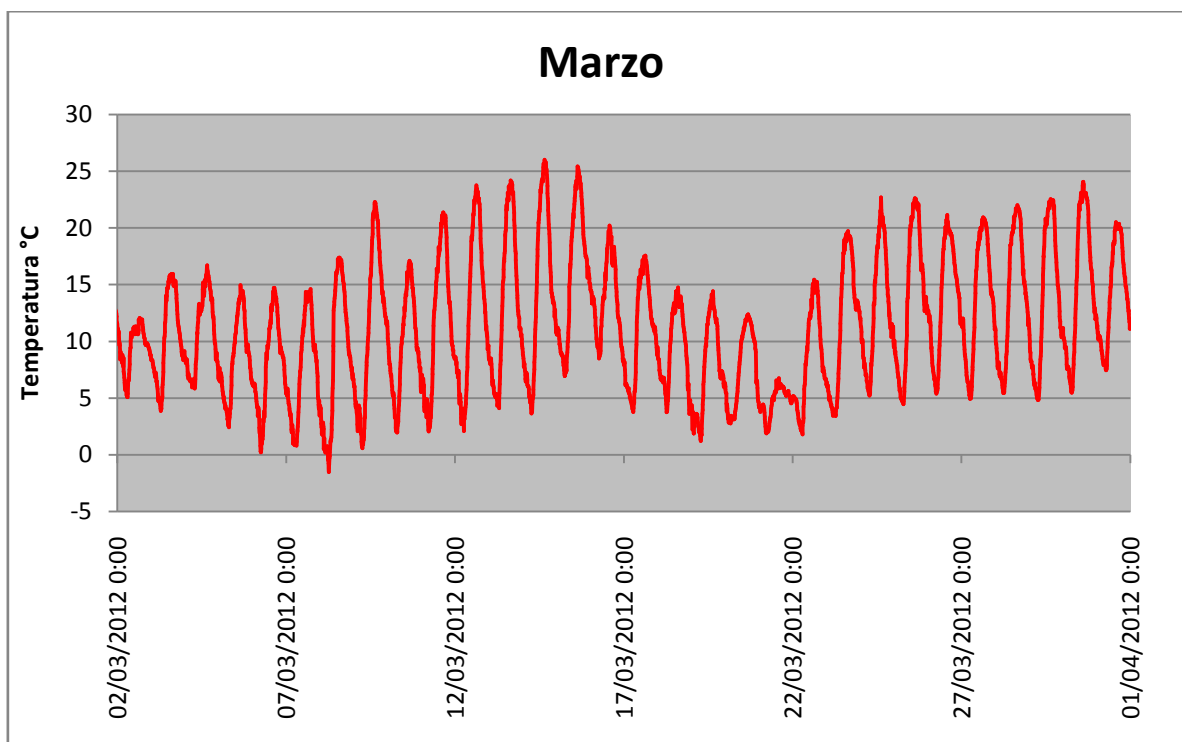


Figura 7.20. Evolución de la temperatura exterior en el mes de Marzo

En la figura 7.21 se representa la evolución de la temperatura para el día más frío del mes, el 8 de Marzo.

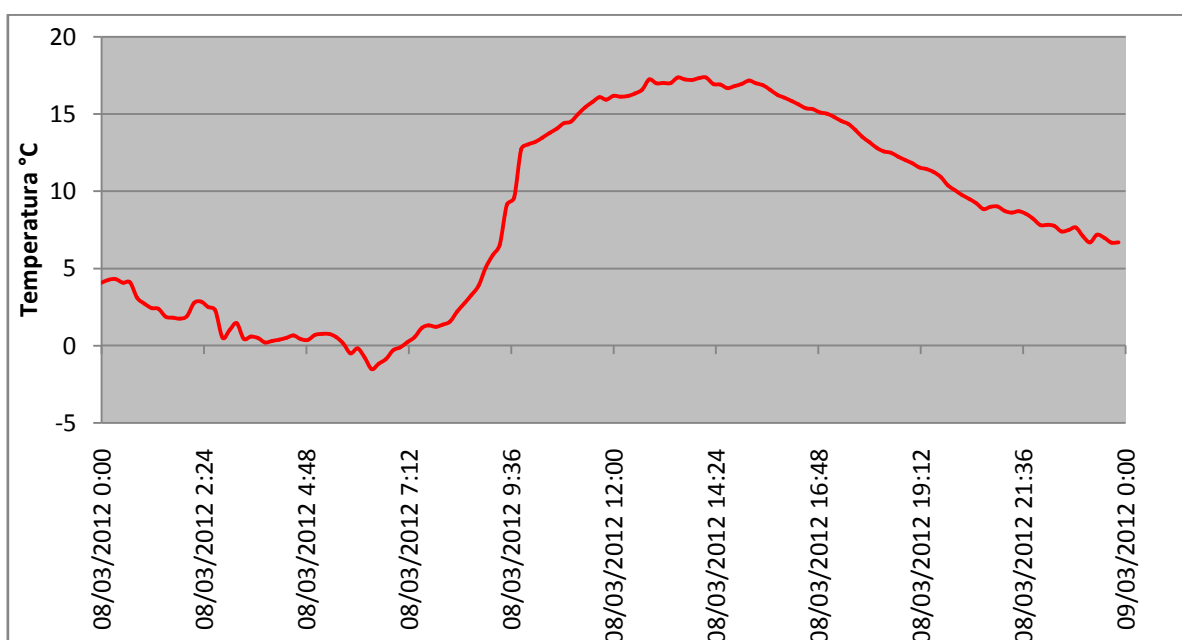


Figura 7.21. Evolución de la temperatura exterior para el día 08/03/2012

- La temperatura mínima se registra a las 6:20 h. con $-1,5^{\circ}\text{C}$
 - La temperatura máxima a las 14:10 h. con $17,3^{\circ}\text{C}$.
 - La temperatura media es de $8,45^{\circ}\text{C}$.
- **Carga térmica y demanda de calefacción para el periodo de conexión**

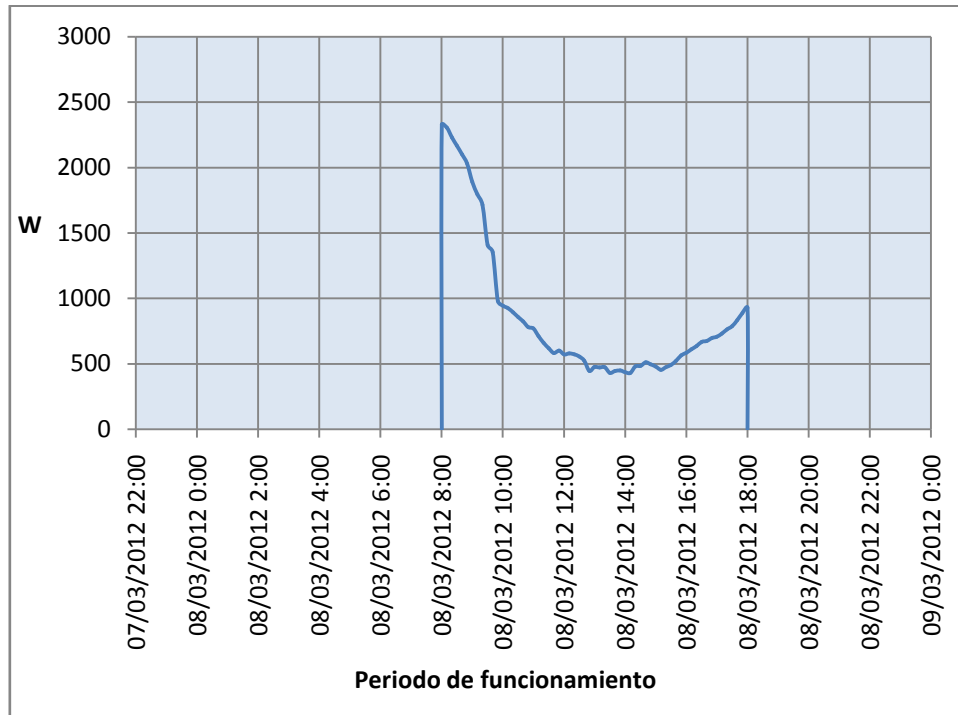


Figura 7.22. Carga térmica de calefacción para el periodo de conexión del 8 de Marzo

La carga máxima se produce a las 8:00 horas con 2327 W y la mínima a las 14:10 horas con 430 W. La demanda térmica media de calefacción será de 8,65 kWh.

- **Evolución de temperaturas para el 8 de Marzo**

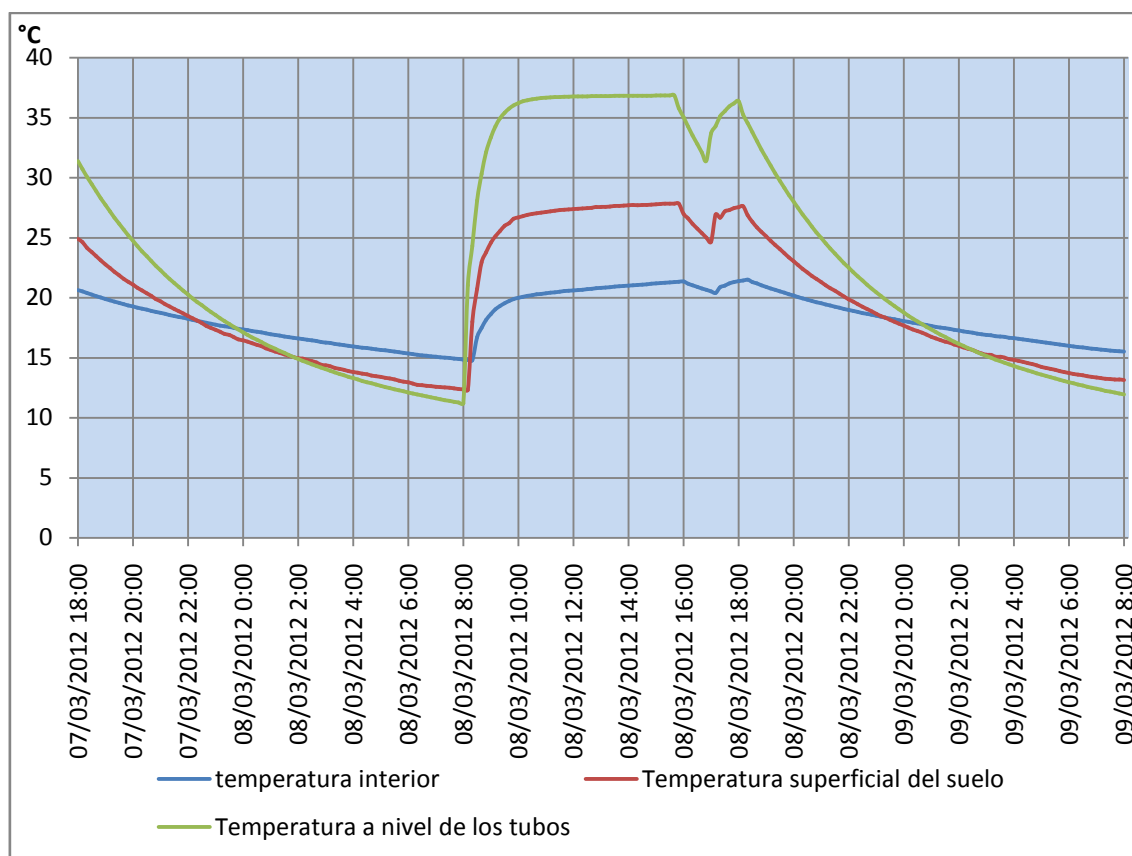


Figura 7.23. Comportamiento del suelo en el mes de Marzo

Tras la desconexión del sistema radiante el día anterior, la temperatura interior, la temperatura superficial del suelo y la temperatura a nivel de los tubos, descienden progresivamente hasta alcanzar su valor mínimo a las 8:00h, instante en el que se conecta el sistema de calefacción siendo 14,8°C, 12,35°C y 11,2°C, respectivamente, sus temperaturas.

La temperatura a nivel de los tubos asciende rápidamente desde el momento que se conecta el sistema, hasta alcanzar 36,7°C a las 11:10h, ésta se mantendrá constante hasta que la temperatura interior supere 21,3°C, es entonces cuando el sistema se desconecta para reducir la temperatura a nivel de los tubos y con ello también la interior. Así, el sistema se desconecta a las 15:40h, es entonces cuando la temperatura a nivel de los tubos comienza a descender de forma lineal hasta que la temperatura interior se sitúa por debajo de 20,7°C, instante en que el sistema se vuelve a conectar (16:50h) para que aumente de nuevo la temperatura interior. En la figura 7.24 se muestra, gráficamente, este proceso, inicialmente describe un pronunciado aumento y moderado después. La temperatura aumenta hasta las 18:00h, cuando se desconecta el sistema, descendiendo hasta 11,9°C, siendo ésta la temperatura a nivel de los tubos en el momento de la conexión al día siguiente.

La temperatura de la superficie del suelo no comienza a elevarse hasta las 8:20h, incrementándose rápidamente hasta 26°C a las 9:30h, esta continúa subiendo lentamente hasta el momento en que el sistema se desconecta a las 15:40h, en este instante, la

temperatura superficial es de 27,8°C, dicha temperatura desciende de forma casi lineal hasta la conexión del sistema a las 16:50h, llegando hasta 25°C, momento en el que el calentamiento de la superficie del suelo describe una curva parecida a la temperatura a nivel de los tubos, es decir, un incremento pronunciado al principio y moderado después, hasta la desconexión del sistema.

En la desconexión a las 18:00h, la temperatura alcanza 27,5°C, y se mantiene durante unos minutos. Pasado este tiempo, la superficie del suelo comienza a perder temperatura. Inicialmente la caída es más rápida, tendiendo al equilibrio con la temperatura a nivel de los tubos, hasta 13,1°C, temperatura superficial del suelo en la conexión del sistema al día siguiente.

La temperatura interior comienza a elevarse poco después de que lo haga la superficie del suelo dibujando una curva parecida a ésta. Ascende rápidamente hasta 20°C a las 10:00h y alcanza la temperatura de confort de 21°C a las 14:00h, continúa ascendiendo hasta que supera 21,3°C a las 15:40h, momento en el que se desconecta el sistema y, por lo tanto, comienza a descender. Cuando la temperatura se sitúa por debajo de 20,7°C (16:50h) el sistema se conecta de nuevo para aumentarla.

En el momento de la desconexión a las 18:00h la temperatura interior es de 21,3°C, aumentará levemente hasta 21,5°C a las 18:20h, momento en el que comienza a bajar lentamente hasta 15,5°C, siendo esta la temperatura interior en la conexión del sistema al día siguiente.

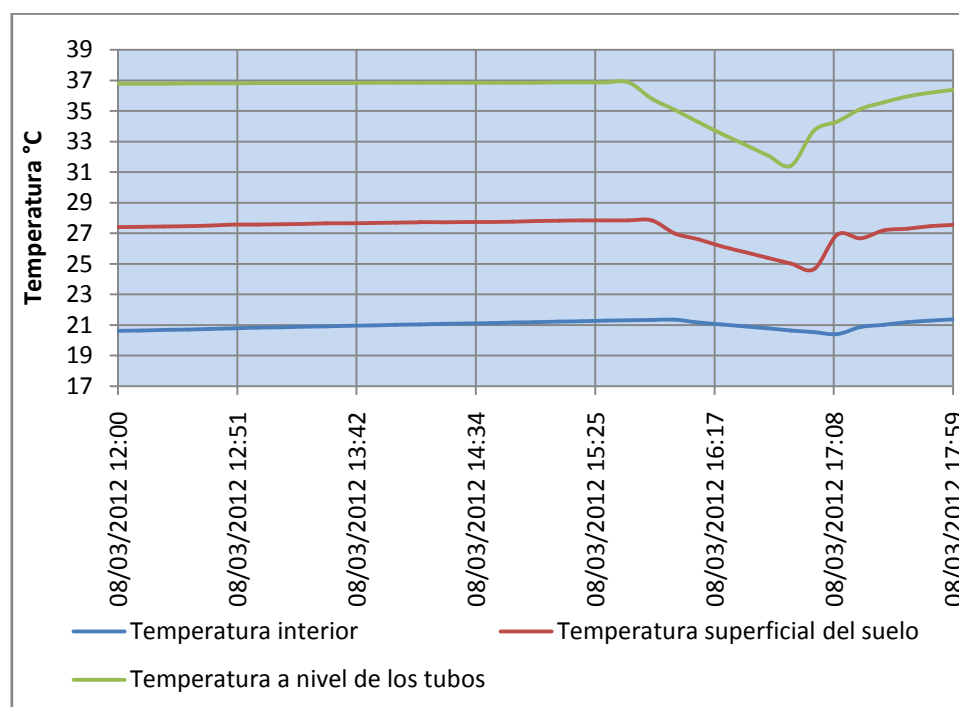


Figura 7.24. Evolución de las temperaturas en la desconexión y conexión del sistema.

- **Calor transmitido por el suelo en el periodo de desconexión.**

El calor transmitido por el suelo en el periodo de desconexión del sistema, desde el desconectado el día anterior (7 de Marzo) a las 18:00h hasta la conexión a las 8:00h lo calculamos con la expresión:

$$Q_t = \Sigma(\rho \cdot V \cdot C_p) \cdot (T_f - T_{ic})$$

Donde:

T_f , Temperatura superficial del suelo a las 18:00h, 24,9 °C.

T_{ic} , Temperatura superficial del suelo a las 8:00h del día siguiente, 12,3°C.

$\Sigma(\rho \cdot V \cdot C_p)$, Sumatorio del producto de las propiedades físicas de los materiales situados por encima del nivel de los tubos de la tabla 7.6.

$$Q_t = 833,8 \cdot (24,9 - 12,3) = 10,5 \text{ kWh}$$

Este calor perdido durante el periodo de desconexión deberá ser aportado por el sistema de calefacción al día siguiente.

- **Calor transmitido al suelo**

El calor transmitido al suelo por el sistema radiante será función del incremento de temperatura máximo que experimenta el suelo durante el periodo de conexión de la calefacción, quedando:

$$Q_g = \Sigma(\rho \cdot V \cdot C_p) \cdot (T_f - T_i)$$

Donde:

Q_g , Calor transmitido al suelo

T_f , Temperatura superficial del suelo a las 18:00h

T_i , Temperatura superficial del suelo a las 8:00h

$$Q_g = 833,8 \cdot (27,5 - 12,3) = 12,67 \text{ kWh}$$

7.7.6 ABRIL

Las temperaturas del mes han estado en sus valores normales. La temperatura máxima se registra el día 1 con 24°C y mínima de 1,2°C el día 17.

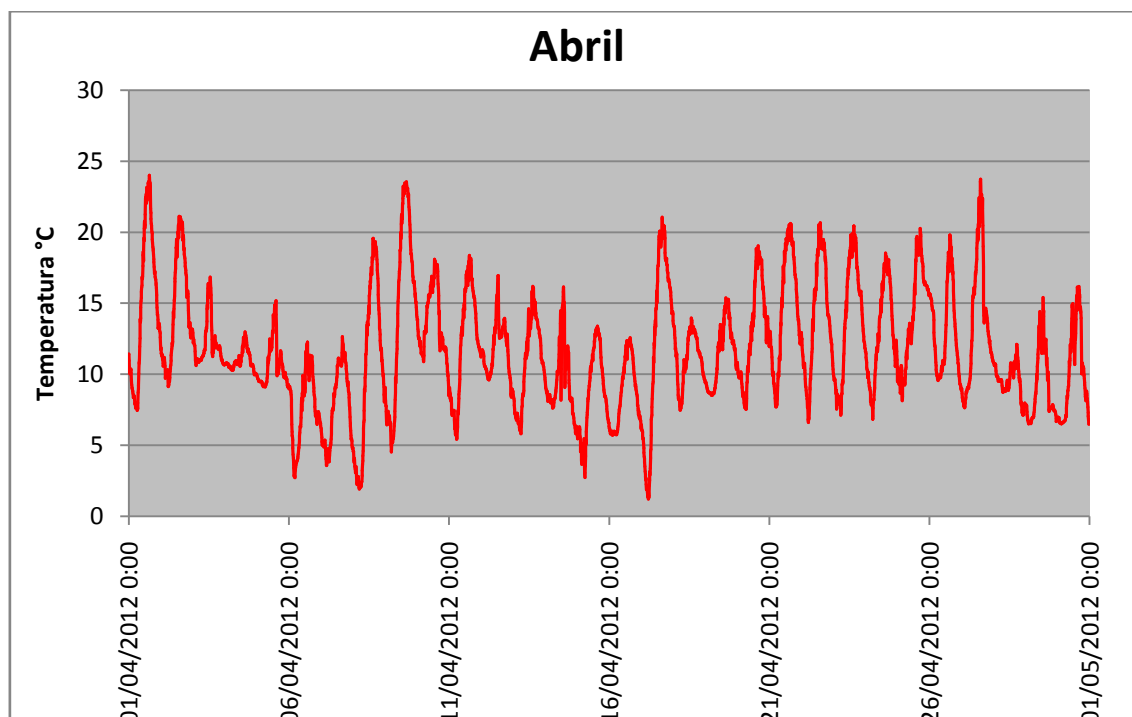


Figura 7.25. Evolución de la temperatura exterior en el mes de Abril

En la siguiente figura se representa la evolución de la temperatura para el día más frío del mes, el 16 de Abril.

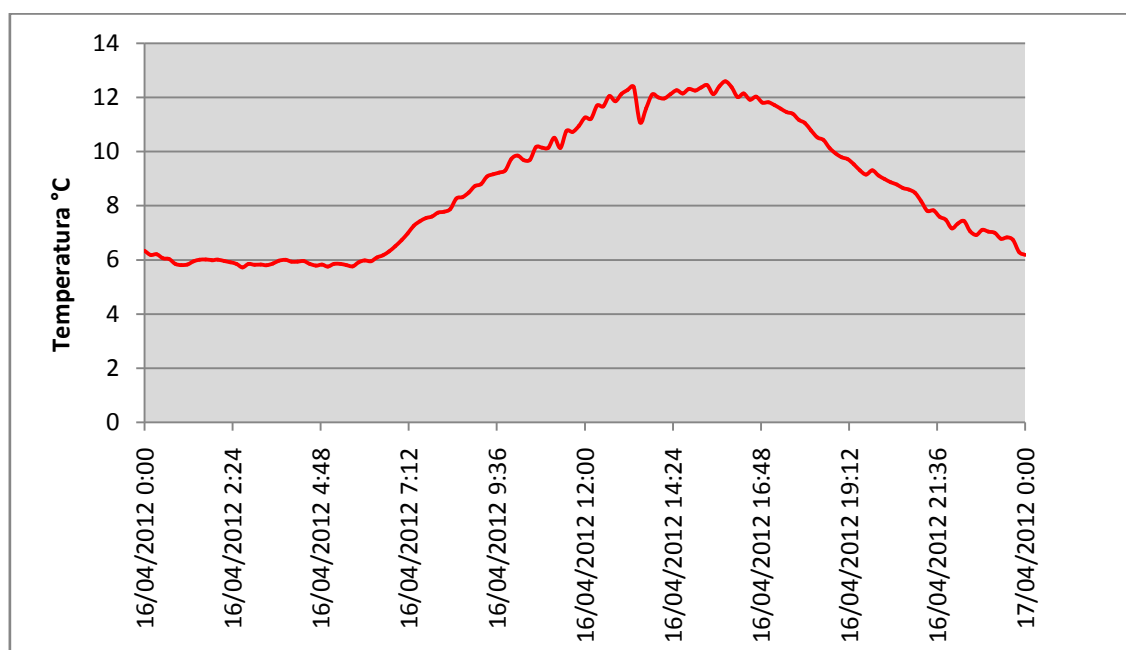


Figura 7.26. Evolución de la temperatura exterior para el día 16/04/2012

- La temperatura mínima se registra a las 5:00 h. con 5,7°C
 - La temperatura máxima a las 15:50 h. con 12,6°C.
 - La temperatura media es de 8,7°C.
- **Carga térmica y demanda de calefacción para el periodo de conexión**

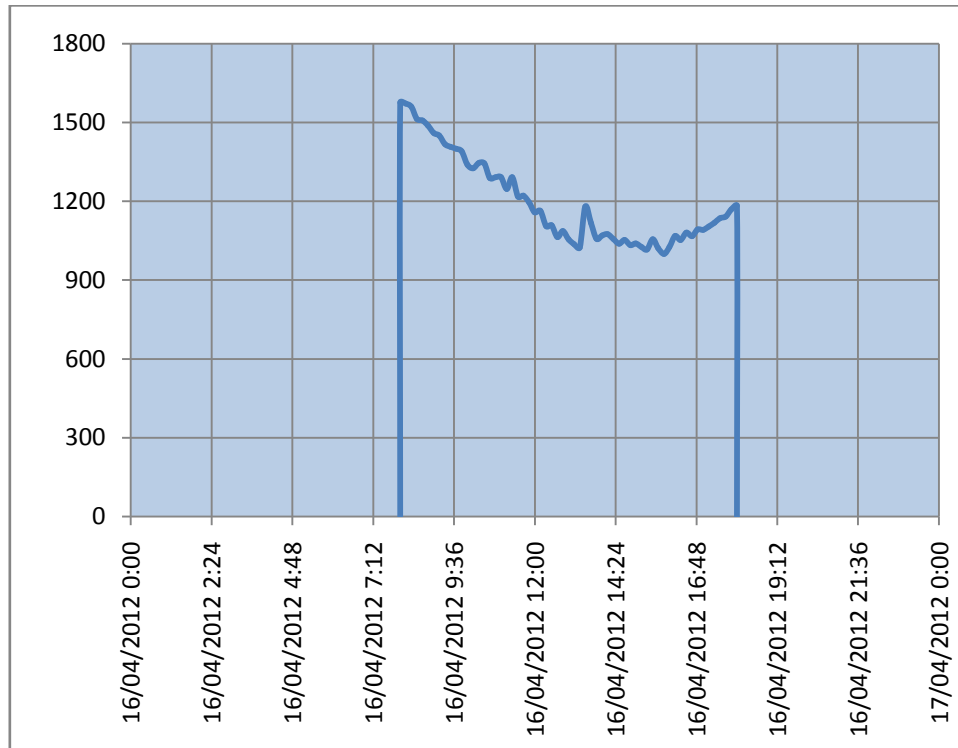


Figura 7.27. Carga térmica de calefacción para el periodo de conexión del 17 de Abril

La carga máxima se produce a las 8:00 horas con 1575 W y la mínima a las 15:50 horas con 1000 W. La demanda térmica media de calefacción será de 11,9 kWh.

- **Evolución de temperatura para el 16 de Abril**

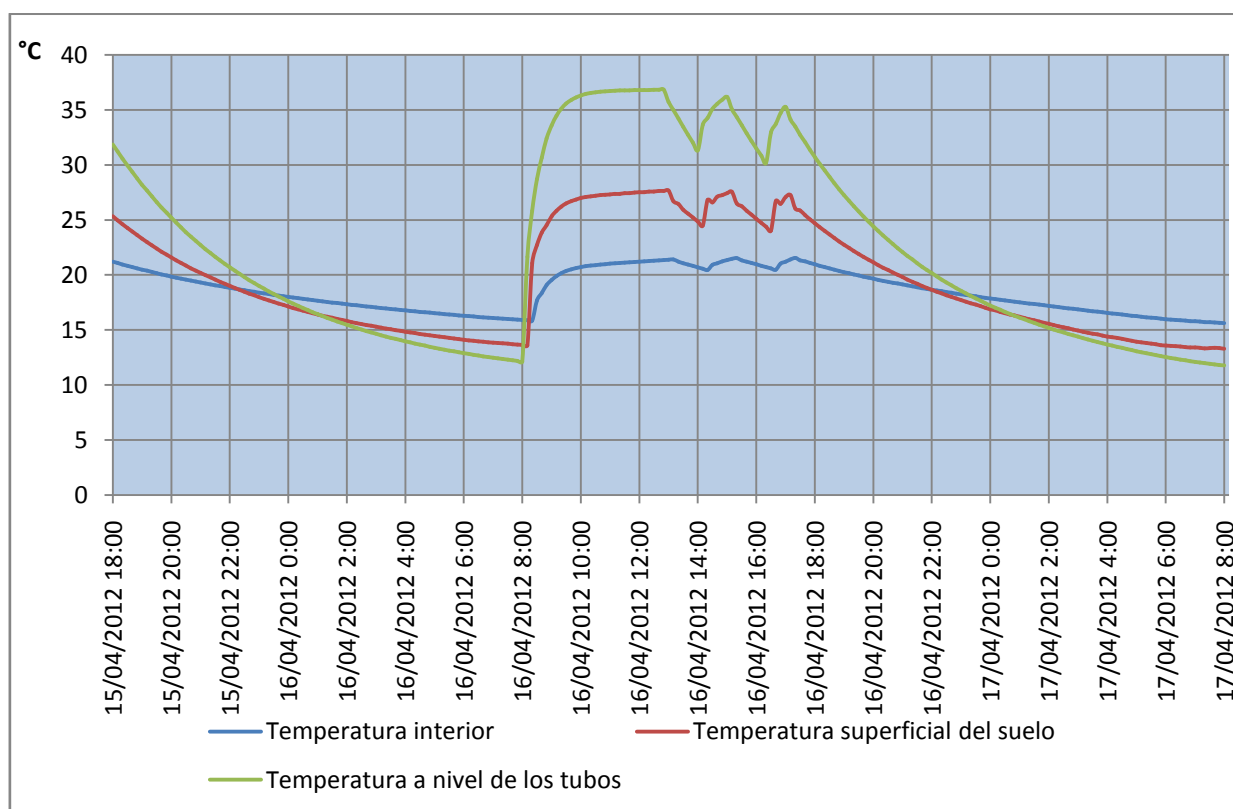


Figura 7.28. Comportamiento del suelo en el mes de Abril

Tras la desconexión del sistema radiante el día anterior, la temperatura interior, la temperatura superficial del suelo y la temperatura a nivel de los tubos, descienden progresivamente hasta alcanzar su valor mínimo a las 8:00h, instante en el que se conecta el sistema de calefacción siendo 15,9°C, 12,2°C y 11,3°C, respectivamente, sus temperaturas.

La temperatura a nivel de los tubos asciende rápidamente desde el momento que se conecta el sistema, hasta alcanzar 36,7°C a las 10:50h, ésta se mantendrá constante hasta que la temperatura interior supere 21,3°C, es entonces cuando el sistema se desconecta para reducir la temperatura a nivel de los tubos y con ello también la interior. Así, el sistema se desconecta a las 13:00h, 15:10h y 16:20h, es entonces cuando la temperatura a nivel de los tubos comienza a descender de forma lineal hasta que la temperatura interior se sitúa por debajo de 20,7°C, instante en que el sistema se vuelve a conectar para que aumente de nuevo la temperatura interior. En la figura 7.29 se muestra, gráficamente, este proceso, inicialmente describe un pronunciado aumento y moderado después. Cuando se desconecta el sistema a las 16:20h, desciende hasta 11,7°C, siendo ésta la temperatura a nivel de los tubos en el momento de la conexión al día siguiente.

La temperatura de la superficie del suelo no comienza a elevarse hasta las 8:20h, incrementándose rápidamente hasta 27°C a las 10:00h, esta continúa subiendo lentamente hasta el momento en que el sistema se desconecta a las 13:00h, 15:10h y 16:20h, en este instante, la temperatura superficial es de 27,6°C, 27,5°C y 26,1°C respectivamente, dicha temperatura desciende de forma casi lineal hasta la conexión del sistema, momento en el que

el calentamiento de la superficie del suelo describe una curva parecida a la temperatura a nivel de los tubos, es decir, un incremento pronunciado al principio y moderado después, hasta la desconexión del sistema.

En la desconexión a las 18:00h, la temperatura alcanza 24,7°C, y se mantiene durante unos minutos. Pasado este tiempo, la superficie del suelo comienza a perder temperatura. Inicialmente la caída es más rápida, tendiendo al equilibrio con la temperatura a nivel de los tubos, hasta 11,5°C, temperatura superficial del suelo en la conexión del sistema al día siguiente.

La temperatura interior comienza a elevarse poco después de que lo haga la superficie del suelo dibujando una curva semejante a ésta. Ascende rápidamente hasta 20°C a las 9:20h y alcanza la temperatura de confort de 21°C a las 11:20h, continúa ascendiendo hasta que supera 21,3°C a las 13:00h, 15:10h y 16:20h, momento en el que se desconecta el sistema y, por lo tanto, comienza a descender. Cuando la temperatura se sitúa por debajo de 20,7°C el sistema se conecta de nuevo para aumentarla.

En el momento de la desconexión a las 18:00h la temperatura interior es de 20,9°C, momento en el que comienza a bajar lentamente hasta 15,6°C, siendo esta la temperatura interior en la conexión del sistema al día siguiente.

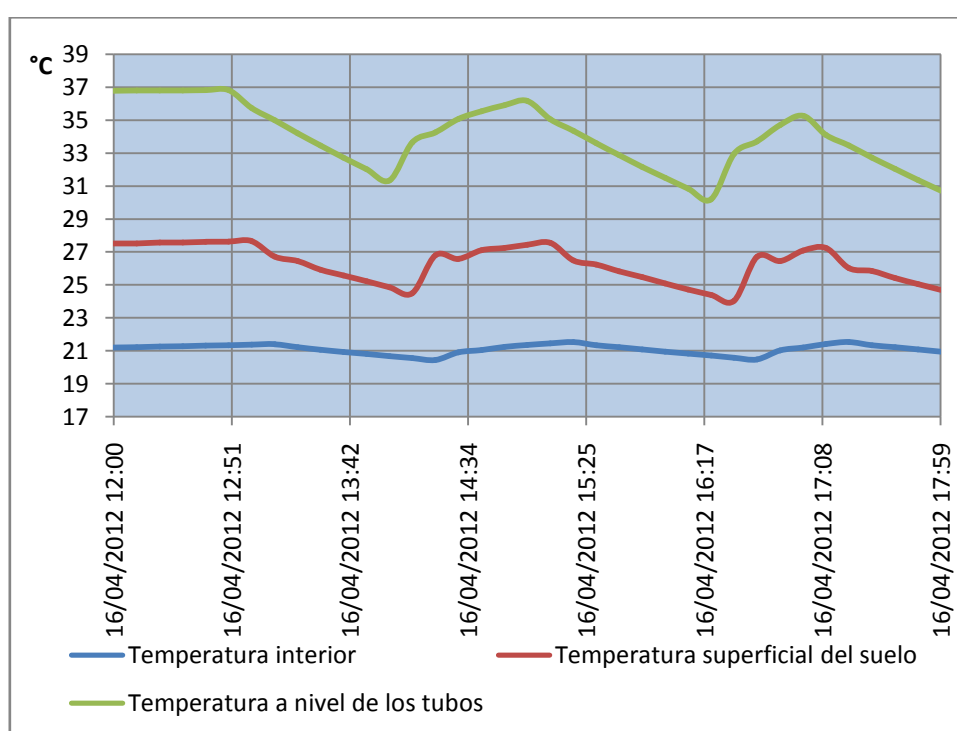


Figura 7.29. Evolución de las temperaturas en la desconexión y conexión del sistema.

- **Calor transmitido por el suelo en el periodo de desconexión.**

El calor transmitido por el suelo en el periodo de desconexión del sistema, desde el desconectado el día anterior (15 de Abril) a las 18:00h hasta la conexión a las 8:00h lo calculamos con la expresión:

$$Q_t = \Sigma(\rho \cdot V \cdot C_p) \cdot (T_f - T_{ic})$$

Donde:

T_f , Temperatura superficial del suelo a las 18:00h, 25,3 °C.

T_{ic} , Temperatura superficial del suelo a las 8:00h del día siguiente, 13,6°C.

$\Sigma(\rho \cdot V \cdot C_p)$, Sumatorio del producto de las propiedades físicas de los materiales situados por encima del nivel de los tubos de la tabla 7.6.

$$Q_t = 833,8 \cdot (25,3 - 13,6) = 9,7 \text{ kWh}$$

Este calor perdido durante el periodo de desconexión deberá ser aportado por el sistema de calefacción al día siguiente.

- **Calor transmitido al suelo**

El calor transmitido al suelo por el sistema radiante será función del incremento de temperatura máximo que experimenta el suelo durante el periodo de conexión de la calefacción, quedando:

$$Q_g = \Sigma(\rho \cdot V \cdot C_p) \cdot (T_f - T_i)$$

Donde:

Q_g , Calor transmitido al suelo

T_f , Temperatura superficial del suelo a las 18:00h

T_i , Temperatura superficial del suelo a las 8:00h

$$Q_g = 833,8 \cdot (24,7 - 13,6) = 9,2 \text{ kWh}$$

7.7.6 COMPARACION DE RESULTADOS

Realizada la simulación en régimen transitorio expondremos los datos más relevantes y compararemos los resultados obtenidos, temperaturas, calor transmitido por el suelo, carga térmica de calefacción, etc., para los días estudiados.

- **Temperaturas mínimas exteriores**

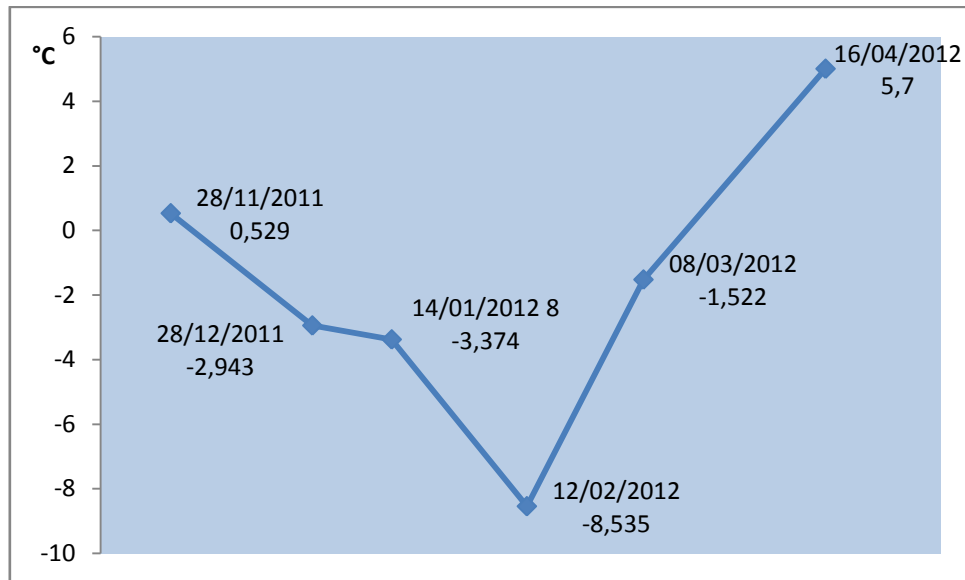


Figura 7.30. Comparación temperaturas mínimas exteriores °C

Las temperaturas más bajas se producen a primera hora del día, entre las 7:00h y las 8:30h, este periodo comprende el proceso de encendido del sistema de calefacción y por lo tanto, el momento más desfavorable para el sistema. En la siguiente figura podemos observar la temperatura media de cada día.

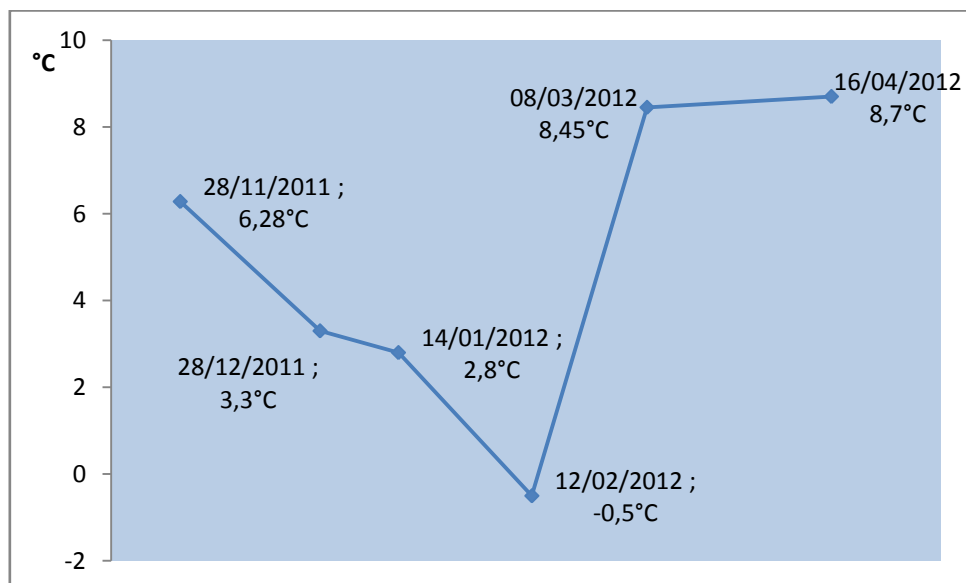


Figura 7.31. Temperatura media de cada día °C.

El día mas frio es el 12 de Febrero, este será el día en el que se produzca la carga térmica de calefacción máxima.

Haciendo uso de las ecuaciones 2.4, 2.5 y 2.6 para el cálculo de la carga térmica total, despreciando las cargas internas, obtenemos los siguientes resultados para una temperatura interna de confort de 21°C y una temperatura media exterior obtenida de la figura 7.31:

Los resultados son:

28/11/2011	1743,1 W
28/12/2011	2099 W
14/01/2012	2158,1 W
12/02/2012	2549,5 W
08/03/2012	1488,1 W
16/04/2012	1441,8 W

Tabla 7.7 Cargas térmicas para los días de Simulación.

- **Temperaturas del ambiente interior en el momento de la desconexión**

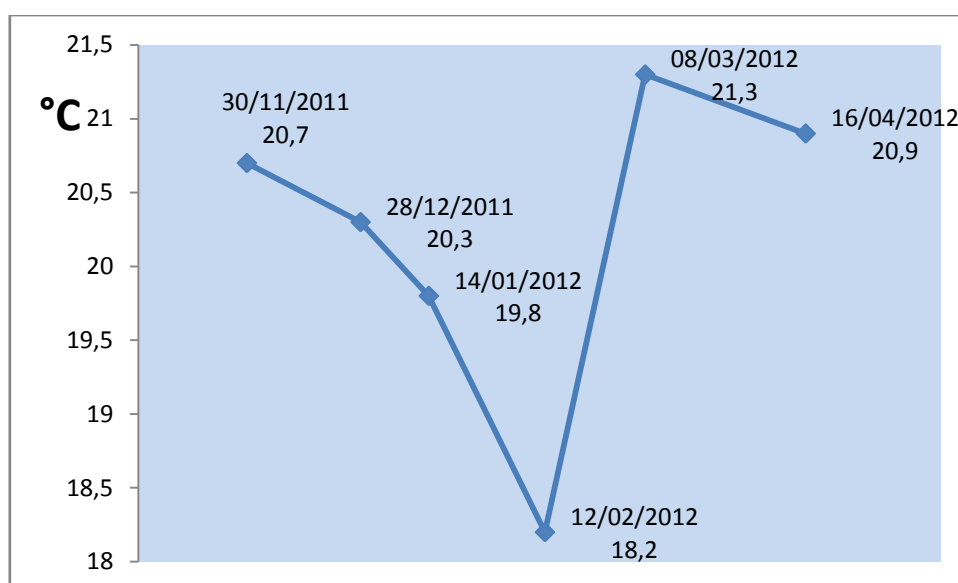


Figura 7.32. Comparación temperaturas del ambiente interior °C

Para los días de Noviembre, Marzo y Abril, el sistema consigue elevar la temperatura interior a la de confort, 21°C. En el resto de días el sistema no lo consigue, esto es debido a las condiciones iniciales impuestas por situarnos en la situación más desfavorable, lo que provoca que la variación de temperatura interior dependa de la temperatura exterior y de la temperatura de la superficie del suelo.

Incluyendo el calor producido por los equipos eléctricos y personas y de la radiación solar, además de aumentar la temperatura de impulsión del agua, se alcanzaría la temperatura de confort de 21°C.

- **Efecto de la inercia térmica.**

El objetivo de la inercia térmica es que la temperatura interior fluctúe solo levemente, siempre dentro de los márgenes del bienestar, y sin consumos excesivos de energía.

Una manera de cuantificar la efectividad de la inercia térmica es el que describe Sanchez-Ostiz, Ana, “*Fachadas: Cerramientos de edificios*”, donde se mide con un coeficiente que relaciona la amplitud de la temperatura interior (temperatura máxima menos temperatura mínima) con la amplitud de la temperatura exterior. En la tabla 7.8 se recoge la efectividad según el resultado:

Coef > 1	Local donde los efectos del sobrecalentamiento son críticos
Coef = 1	La temperatura varía en el interior al mismo ritmo que en el exterior
Coef entre 1 y 0.5	Local sin inercia térmica
Coef < 0,5	Local con inercia térmica. Repercute en el local menos del 50% de la fluctuación de la temperatura exterior

Tabla 7.8. Efectividad de la inercia térmica

En la tabla 7.9 se recogen los valores de la amplitud de la temperatura interior y exterior para los días estudiados y los resultados obtenidos.

<i>Días de Estudio</i>	<i>Amp. T. int Δ_{int} (°C)</i>	<i>Amp. T. ext Δ_{ext} (°C)</i>	<i>$\Delta_{int} / \Delta_{ext}$</i>
<i>28 de Noviembre</i>	6,3	13,47	0,46
<i>28 de Diciembre</i>	6,6	14,3	0,46
<i>14 de Enero</i>	6,7	14,7	0,45
<i>12 de Febrero</i>	7	15,2	0,46
<i>8 de Marzo</i>	6,5	18,7	0,34
<i>16 de Abril</i>	5,4	8,8	0,6

Tabla 7.9. Resultado coeficiente entre temperatura interior y exterior

De los resultados obtenidos podemos observar que es un local con inercia térmica. Comprobamos que la amplitud de la temperatura interior es parecida en todos los días estudiados. El 16 de Abril presenta un valor alto debido a que la amplitud de la temperatura exterior es pequeña ya que registra una temperatura mínima exterior más alta comparada con el resto de días estudiados.

- **Temperatura superficial del suelo**

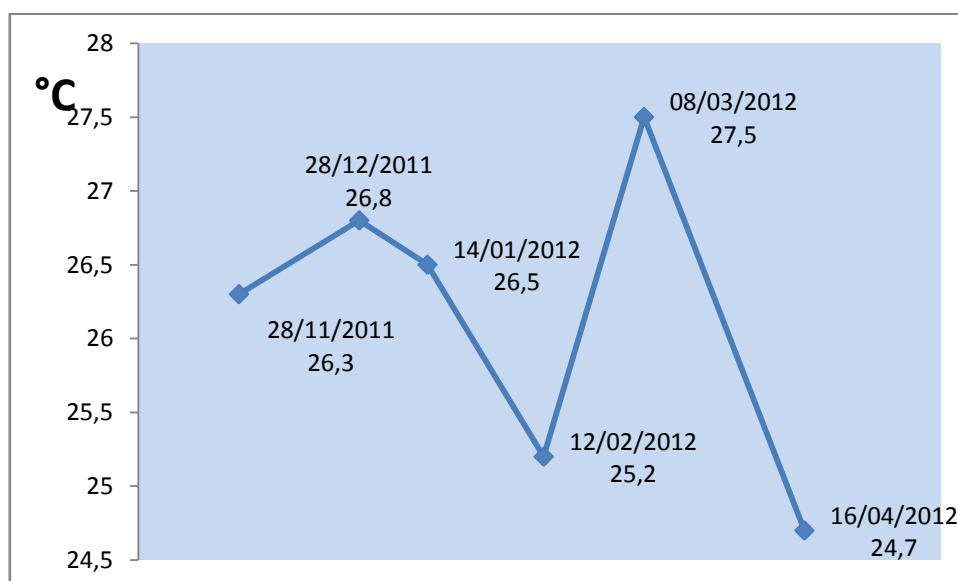


Figura 7.33. Comparación temperaturas superficiales del suelo °C.

La temperatura de la superficie del suelo se mantiene dentro de los valores de acuerdo con la Norma UNE EN 1264 sin superar la temperatura máxima de 29°C.

Considerando la temperatura de impulsión del agua la misma para cada día, la temperatura superficial obtenida dependerá de la temperatura exterior. El 16 de abril es la más baja debido a la evolución de la temperatura interior, como se observa en la figura 7.28, donde el sistema se desconecta a las 16:50h hasta la conexión al día siguiente y la temperatura superficial del suelo desciende progresivamente hasta la conexión del sistema al día siguiente.

- **Calor transmitido por el suelo en el periodo de la desconexión**

El calor transmitido por el suelo en el periodo de desconexión del sistema, según los resultados obtenidos de la aplicación de la norma UNE EN 15377 para cada día estudiado es:

28 de Noviembre	9,7 kWh
28 de Diciembre	12,75 kWh
14 de Enero	13 kWh
12 de Febrero	14 kWh
8 de Marzo	10,5 kWh
16 de Abril	9,7 kWh

Tabal 7.10. Calor transmitido por el suelo en el periodo de desconexión.

En la tabla se observa que el valor más alto corresponde al día más frío, el 12 de Febrero, esto es, que la diferencia de temperaturas en el suelo durante el periodo de desconexión es el más elevado. Los valores más bajos, 28 de Noviembre y 16 de Abril, corresponden a los días con la temperatura mínima exterior más alta, lo que conlleva a una amplitud de la temperatura interior durante el periodo de desconexión más baja y con ello, a una diferencia de

temperaturas en el suelo menor. El calor medio transmitido para los días estudiados es de 11,6 kWh/día.

- **Calor transmitido al suelo durante el periodo de conexión.**

28 de Noviembre	11,67 kWh
28 de Diciembre	12,84 kWh
14 de Enero	13,17 kWh
12 de Febrero	13,9 kWh
8 de Marzo	12,67 kWh
16 de Abril	9,2 kWh

Tabla 7.11 Calor transmitido al suelo en el periodo de calefacción

El valor más alto se produce para el día más frío, el 12 de Febrero al registrarse el incremento de la temperatura del suelo más alto de los días estudiados. El valor más bajo es el 16 de Abril, ya que desde la desconexión a las 16:50h, la temperatura superficial del suelo desciende progresivamente hasta la conexión al día siguiente, lo que provoca una amplitud de temperatura en la superficie del suelo más baja que los demás días estudiados. El calor medio transmitido al suelo durante el periodo de conexión para los días estudiados es de 12,25 kWh/día.

8 METODOLOGÍA DE CÁLCULO DEL MÉTODO DE LA CAPACIDAD TÉRMICA GLOBAL

El método que se desarrolla en este capítulo es el de la capacidad térmica global, con el cual podemos conocer, de manera aproximada, el calor transmitido por el suelo en el periodo de desconexión del sistema. Éste, es un método simplificado en el que no tendremos en consideración el efecto de la radiación y tampoco la de la superficie del suelo.

Seguiremos la metodología descrita por J.P. Holman (Transferencia de Calor, 1998). El método de la capacidad térmica global es un balance de energía entre el suelo y el aire interior, donde la pérdida de calor por conducción desde el interior del suelo y es transferido por convección al aire.

La aplicabilidad del análisis de la capacidad térmica global viene sujeto al cumplimiento de las hipótesis:

- El suelo se comporta como sustancia sólida para la aplicabilidad del método sometido a régimen transitorio.

- Y que el modelo de análisis de la capacidad global supone una distribución uniforme de temperaturas en el suelo y es equivalente a decir que la resistencia convectiva de la superficie es grande comparada con la resistencia conductiva del interior.

Se puede esperar que este método proporcione estimaciones razonables con un error del orden del 5 por 100, según J.P. Holman, cuando se cumple la condición:

$$\frac{h \cdot (V/A)}{k} \ll 0,1$$

Donde:

h , Coeficiente de convección ($\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$)

V , Volumen del hormigón situado por encima de los tubos (m^3)

A , Área del suelo (m^2)

k , Conductividad térmica ($\text{W/m } ^\circ\text{C}$)

Si consideramos $V/A=s$ como una longitud característica del suelo, se le denomina *número de Biot*:

$$\frac{h \cdot s}{k} = Bi \quad (8.1)$$

Holman señala un error en el conocimiento del coeficiente de convección del 25%, de modo que se debería permitir un cierto margen en la aplicación de la condición.

Para la obtención del coeficiente de convección consideramos que las puertas y ventanas están cerradas, aunque siempre existirá una ventilación residual consecuencia de la

renovación mínima o infiltración de aire. Consideraremos nulo el efecto de la radiación en el coeficiente de convección para el periodo de desconexión.

Con estas dos condiciones podemos calcular el coeficiente de convección natural de forma analítica, según los grupos adimensionales denominados, Números de Nusselt, Grashof y Prandtl o hallarlo de forma experimental, donde el valor del coeficiente de convección natural se puede estimar descontando del coeficiente de convección superficial interior h_i ($10 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ según CTE, $9,26 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ según ASHRAE) la contribución de la radiación, es decir, el coeficiente de radiación h_r ($5,23 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ según ASHRAE). Un valor aproximado para la estimación experimental, es el dado por ASHRAE, donde el valor del coeficiente de convección natural en dirección ascendente de 0° es de $4,03 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ y según el CTE el valor sería de $4,77 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$.

En nuestro caso, hallaremos el coeficiente de convección natural de forma analítica según el método descrito por J.P Holman (Transferencia de Calor, 1998):

- **Calculo del coeficiente de convección natural**

La convección natural, o libre, se observa como resultado del movimiento del fluido debido a los cambios de la densidad que resultan del proceso de calentamiento. El movimiento del aire resulta de las fuerzas de flotabilidad impuestas sobre el fluido cuando su densidad en la proximidad de la superficie de transferencia de calor disminuye como consecuencia del proceso de calentamiento.

Las variaciones de densidad son realmente pequeñas, por ello consideramos que el flujo es incompresible, esto es, presión constante.

Recordando el método de cálculo del coeficiente de convección natural:

- Nusselt

$$Nu_f = C \cdot (Gr_f Pr_f)^m \quad (8.2)$$

Donde el subíndice f indica que las propiedades en los grupos adimensionales se evalúan a la temperatura de película T_f :

$$T_f = \frac{T_s + T_i}{2}$$

En nuestro caso, calcularemos T_f a presión atmosférica para una temperatura ambiente, T_i , de 20°C (temperatura interior a utilizar según UNE EN 1264) y para la temperatura superficial del suelo, T_s , escogeremos el valor límite que establece la norma de 29°C , con lo que abarcamos todo el rango de temperaturas en los que se puede encontrar la superficie del suelo con el sistema en funcionamiento.

La temperatura de película es:

$$T_f = \frac{29 + 20}{2} = 24,5 \text{ °C} = 297,5 \text{ K}$$

A efectos de cálculo escogeremos las propiedades del aire a 25 °C son según el ANEXO A:

$$\begin{aligned}\beta &= \frac{1}{298} = 3,35 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} & k &= 0,026 \frac{\text{W}}{\text{m °C}} \\ v &= 1,54 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} & Pr &= 0,7\end{aligned}$$

Y las constantes C y m dependerán de Ra.

- Rayleigh

Es el producto del número de Grashof por el número de Prandtl.

$$Ra = Gr \cdot Pr$$

Calculando Rayleigh según (8.3):

$$Ra = GrPr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_{ms} - T_{amb}) \cdot L^3}{v^2} \cdot Pr \quad (8.3)$$

La dimensión característica que se utiliza en los números de Nusselt y Grashof depende de la geometría. En nuestro caso se trata de una superficie horizontal con flujo constante.

$$L = \frac{\text{Area}}{\text{Perimetro}} = \frac{24,55}{21,9} = 1,12 \text{ m}$$

Introduciendo datos en (8.3), queda:

$$Ra = GrPr = \frac{9,8 \cdot 3,35 \cdot 10^{-3} \cdot (30 - 20) \cdot 1,12^3}{(1,54 \cdot 10^{-5})^2} \cdot 0,7 = 1,36 \cdot 10^9$$

Para $GrPr > 2 \cdot 10^8$ según J.P. Holman (Transferencia de Calor 1998) la ecuación (8.2) para placas horizontales es:

$$Nu = 0,16(GrPr)^{1/3} = 177,3$$

El coeficiente de convección natural:

$$h_c = \frac{Nu \cdot k}{L} = \frac{177,3 \cdot 0,026}{1,12} = 4,12 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

En la tabla 8.1 podemos observar los diferentes valores de h

ASHRAE	4,03
CTE	4,77
Est. Analítica	4,12

Tabla 8.1. Coeficientes de convección natural en ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)

Una vez obtenido el coeficiente de convección natural h ($4,12 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ C$), la introducimos en la ecuación 8.1, con una longitud característica del suelo, $s = V/A$, de $0,03 \text{ m}$ y una conductividad de $1,63 \text{ m } ^\circ C/W$:

$$\frac{4,12 \cdot 0,03}{1,63} = 0,07 < 0,1$$

Una vez comprobado la validez del método realizamos el balance de energía entre el suelo y el aire, ecuación 8.4, que, como se dijo anteriormente, es la pérdida de calor por conducción desde el interior del suelo y que es transferido por convección al aire, así nos queda:

$$q = hA(T - T_{int}) = -C_p \rho V \frac{dT}{dt} \quad (8.4)$$

Donde:

T , Es la temperatura del suelo ($^\circ C$)

T_{int} , Temperatura ambiente interior ($^\circ C$)

h , Coeficiente de convección ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)

V , Volumen (m^3)

A , Área del suelo (m^2)

ρ , densidad (Kg/m^3)

C_p , Calor específico ($J/Kg \text{ } K$)

Si aplicamos la condición inicial:

$$T = T_0 \text{ en } t = 0$$

Donde T_0 es la temperatura superficial del suelo en el momento de la desconexión del sistema. El valor utilizado será el obtenido en la simulación para cada día.

La solución de la ecuación 8.4 es:

$$\frac{T(t) - T_{int}}{T_0 - T_{int}} = e^{-\left(\frac{h \cdot A}{\rho \cdot C_p \cdot V}\right) \cdot t} \quad (8.5)$$

Donde:

T , Temperatura del suelo en el instante t

T_0 , Temperatura de la superficie del suelo en el instante de desconexión.

T_{int} , Es la variación de la temperatura interior en el periodo de la desconexión. Los valores serán los obtenidos en la simulación.

La temperatura interior es dependiente del tiempo pero en nuestro caso supondremos la variación lineal tomando:

Para $t = 0$ la T_{int} registrada a las 18:00h

Para $t = 14 \text{ h}$ (50400 s) la T_{int} a las 8:00h del día siguiente

Hemos supuesto la variación de la temperatura interior lineal, pero no es así, la variación describe una curva del tipo exponencial negativa.

Despejando la ecuación 8.5, la temperatura del suelo en función del tiempo $T(t)$ queda 8.6:

$$T(t) = T_{int}(t) + (T_0 - (T_{int}(t))) \cdot e^{-\left(\frac{h \cdot A}{\rho \cdot C_p \cdot V}\right) \cdot t} \quad (8.6)$$

Para la aplicación del método tomaremos como constante el término:

$$\frac{h \cdot A}{\rho \cdot C_p \cdot V} = \frac{4,12 \cdot 24,55}{2400 \cdot 1000 \cdot 0,73} = 5,7 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$$

Utilizando las propiedades del hormigón, material situado por encima de las tuberías encargado de acumular calor y cederlo al interior.

La variación de la temperatura del suelo $T(t)$ es 8.7:

$$T(t) = T_{int}(t) + (T_0 - (T_{int}(t))) \cdot e^{-(5,7 \cdot 10^{-5}) \cdot t} \quad (8.7)$$

Para conocer el calor transmitido durante el periodo de desconexión del sistema aplicamos la ecuación 8.8:

$$Q_t = (\rho \cdot V) C_p \cdot (T_f - T_{ic}) \quad (8.8)$$

Donde:

Q_t , Es el calor transmitido en el periodo de desconexión (Wh)

T_f , Es la temperatura final a la que se encuentra el suelo a la hora de desconexión del sistema de calefacción (°C)

T_{ic} , Es la temperatura inicial del suelo a la hora de puesta en marcha (°C)

8.1 RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DEL METODO

Los resultados obtenidos para los mismos días de estudiados en la simulación son:

8.1.1 28 DE NOVIEMBRE

- Condiciones iniciales

La temperatura inicial de la superficie del suelo T_o obtenida a las 18:00h del 27 de Noviembre:

$$T_o = 24,15^{\circ}C$$

La ecuación que describe la temperatura interior es:

$$\text{Para } t = 0 \text{ (18:00 h del día anterior) la } T_{int} = 20,6^{\circ}C$$

$$\text{Para } t = 14 \text{ h (50400 s) (8:00 h) la } T_{int} = 15,06^{\circ}C$$

La ecuación queda:

$$T_{int} = -1,09 \cdot 10^{-4} \cdot t + 20,6$$

- Resultado

Sustituyendo en la ecuación 8.7 y resolviendo, queda:

$$T(t) = -1,09 \cdot 10^{-4}t + 20,6 + (24,15 - (-1,09 \cdot 10^{-4}t + 20,6)) \cdot e^{-(5,7 \cdot 10^{-5}) \cdot t}$$

Para $t = 50400$ seg. La temperatura superficial del suelo a las 8:00h. del 28 de Noviembre es:

$$T = 15,6^{\circ}C$$

- Calor transmitido por el suelo

El calor total transmitido desde la desconexión a las 18:00h el día anterior hasta la conexión a las 8:00 se calcula mediante:

$$Q_t = \Sigma(\rho \cdot V \cdot C_p) \cdot (T_f - T_{ic})$$

Donde:

T_f , Temperatura superficial del suelo a las 18:00h, 27,5 °C.

T_{ic} , Temperatura superficial del suelo a las 8:00h, 16,5°C.

$\Sigma(\rho \cdot V \cdot C_p)$, Sumatorio del producto de las propiedades físicas de los materiales situados por encima del nivel de los tubos obtenido del cálculo de la tabla 7.7.

$$Q_t = 833,8 \cdot (24,15 - 15,6) = 7,1 \text{ KWh}$$

8.1.2 28 DE DICIEMBRE

- Condiciones iniciales

La temperatura inicial de la superficie del suelo T_o obtenida a las 18:00h del 27 de diciembre:

$$T_o = 26,7^{\circ}\text{C}$$

La ecuación que describe la temperatura interior es:

$$\text{Para } t = 0 \text{ (18:00 h del día anterior) la } T_{int} = 20,3^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Para } t = 14 \text{ h (50400 s) (8:00 h) la } T_{int} = 13,8^{\circ}\text{C}$$

La ecuación queda:

$$T_{int} = -1,28 \cdot 10^{-4} \cdot t + 20,3$$

- Resultado

Sustituyendo en la ecuación 8.7 y resolviendo, queda:

$$T(t) = -1,28 \cdot 10^{-4}t + 20,3 + (26,7 - (-1,28 \cdot 10^{-4}t + 20,3)) \cdot e^{-(5,7 \cdot 10^{-5}) \cdot t}$$

Para $t=50400$ seg. La temperatura superficial del suelo a las 8:00h. del 28 de Diciembre es:

$$T = 14,5^{\circ}\text{C}$$

- Calor transmitido por el suelo

El calor total transmitido desde la desconexión a las 18:00h el día anterior hasta la conexión a las 8:00 se calcula mediante:

$$Q_t = \Sigma(\rho \cdot V \cdot C_p) \cdot (T_f - T_{ic})$$

Donde:

T_f , Temperatura superficial del suelo a las 18:00h, 26,7 °C.

T_{ic} , Temperatura superficial del suelo a las 8:00h, 14,5°C.

$\Sigma(\rho \cdot V \cdot C_p)$, Sumatorio del producto de las propiedades físicas de los materiales situados por encima del nivel de los tubos obtenido del cálculo de la tabla 8.7.

$$Q_t = 833,8 \cdot (26,7 - 14,5) = 10,1 \text{ KWh}$$

8.1.3 14 DE ENERO

- Condiciones iniciales

La temperatura inicial de la superficie del suelo T_o obtenida a las 18:00h del 13 de Enero:

$$T_o = 26,4^{\circ}C$$

La ecuación que describe la temperatura interior es:

$$\text{Para } t = 0 \text{ (18:00 h del día anterior) la } T_{int} = 19,7^{\circ}C$$

$$\text{Para } t = 14 \text{ h (50400 s) (8:00 h) la } T_{int} = 13,2^{\circ}C$$

La ecuación queda:

$$T_{int} = -1,28 \cdot 10^{-4} \cdot t + 19,7$$

- Resultado

Sustituyendo en la ecuación 8.7 y resolviendo, queda:

$$T(t) = -1,28 \cdot 10^{-4}t + 19,7 + (26,4 - (-1,28 \cdot 10^{-4}t + 19,7)) \cdot e^{-(5,7 \cdot 10^{-5}) \cdot t}$$

Para $t=50400$ seg. La temperatura superficial del suelo a las 8:00h. del 14 de Enero es:

$$T = 13,9^{\circ}C$$

- Calor transmitido por el suelo

El calor total transmitido desde la desconexión a las 18:00h el día anterior hasta la conexión a las 8:00 se calcula mediante:

$$Q_t = \Sigma(\rho \cdot V \cdot C_p) \cdot (T_f - T_{ic})$$

Donde:

T_f , Temperatura superficial del suelo a las 18:00h, $26,4^{\circ}C$.

T_{ic} , Temperatura superficial del suelo a las 8:00h, $13,9^{\circ}C$.

$\Sigma(\rho \cdot V \cdot C_p)$, Sumatorio del producto de las propiedades físicas de los materiales situados por encima del nivel de los tubos obtenido del cálculo de la tabla 7.7.

$$Q_t = 833,8 \cdot (26,4 - 13,9) = 10,4 \text{ KWh}$$

8.1.4 12 DE FEBRERO

- Condiciones iniciales

La temperatura inicial de la superficie del suelo T_o obtenida a las 18:00h del 11 de Febrero:

$$T_o = 25,4^{\circ}\text{C}$$

La ecuación que describe la temperatura interior es:

$$\text{Para } t = 0 \text{ (18:00 h del día anterior) la } T_{int} = 18,2^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Para } t = 14 \text{ h (50400 s) (8:00 h) la } T_{int} = 11,1^{\circ}\text{C}$$

La ecuación queda:

$$T_{int} = -1,4 \cdot 10^{-4} \cdot t + 18,2$$

- Resultado

Sustituyendo en la ecuación 8.7 y resolviendo, queda:

$$T(t) = -1,4 \cdot 10^{-4}t + 18,2 + (25,4 - (-1,4 \cdot 10^{-4}t + 18,2)) \cdot e^{-(5,7 \cdot 10^{-5}) \cdot t}$$

Para $t=50400$ seg. La temperatura superficial del suelo a las 8:00h. del 11 de Febrero es:

$$T = 11,9^{\circ}\text{C}$$

- Calor transmitido por el suelo

El calor total transmitido desde la desconexión a las 18:00h el día anterior hasta la conexión a las 8:00 se calcula mediante:

$$Q_t = \Sigma(\rho \cdot V \cdot C_p) \cdot (T_f - T_{ic})$$

Donde:

T_f , Temperatura superficial del suelo a las 18:00h, 25,4 °C.

T_{ic} , Temperatura superficial del suelo a las 8:00h, 11,9°C.

$\Sigma(\rho \cdot V \cdot C_p)$, Sumatorio del producto de las propiedades físicas de los materiales situados por encima del nivel de los tubos obtenido del cálculo de la tabla 7.7.

$$Q_t = 813,3 \cdot (25,4 - 11,9) = 11,25 \text{ KWh}$$

9.1.5 8 DE MARZO

- Condiciones iniciales

La temperatura inicial de la superficie del suelo T_o obtenida a las 18:00h del 7 de Marzo:

$$T_o = 24,9^{\circ}\text{C}$$

La ecuación que describe la temperatura interior es:

$$\text{Para } t = 0 \text{ (18:00 h del día anterior) la } T_{int} = 20,6^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Para } t = 14 \text{ h (50400 s) (8:00 h) la } T_{int} = 14,8^{\circ}\text{C}$$

La ecuación queda:

$$T_{int} = -1,11 \cdot 10^{-4} \cdot t + 20,6$$

- Resultado

Sustituyendo en la ecuación 8.7 y resolviendo, queda:

$$T(t) = -1,1 \cdot 10^{-4}t + 20,6 + (24,9 - (-1,1 \cdot 10^{-4}t + 20,6)) \cdot e^{-(5,7 \cdot 10^{-5}) \cdot t}$$

Para $t=50400$ seg. La temperatura superficial del suelo a las 8:00h. del 8 de Marzo es:

$$T = 15,4^{\circ}\text{C}$$

- Calor transmitido por el suelo

El calor total transmitido desde la desconexión a las 18:00h el día anterior hasta la conexión a las 8:00 se calcula mediante:

$$Q_t = \Sigma(\rho \cdot V \cdot C_p) \cdot (T_f - T_{ic})$$

Donde:

T_f , Temperatura superficial del suelo a las 18:00h, 24,9 °C.

T_{ic} , Temperatura superficial del suelo a las 8:00h, 15,4°C.

$\Sigma(\rho \cdot V \cdot C_p)$, Sumatorio del producto de las propiedades físicas de los materiales situados por encima del nivel de los tubos obtenido del cálculo de la tabla 7.7.

$$Q_t = 813,3 \cdot (24,9 - 15,4) = 7,9 \text{ KWh}$$

9.1.6 16 DE ABRIL

- Condiciones iniciales

La temperatura inicial de la superficie del suelo T_o obtenida a las 18:00h del 15 de Abril:

$$T_o = 25,3^{\circ}\text{C}$$

La ecuación que describe la temperatura interior es:

$$\text{Para } t = 0 \text{ (18:00 h del día anterior) la } T_{int} = 21,2^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Para } t = 14 \text{ h (50400 s) (8:00 h) la } T_{int} = 15,9^{\circ}\text{C}$$

La ecuación queda:

$$T_{int} = -1,05 \cdot 10^{-4} \cdot t + 21,2$$

- Resultado

Sustituyendo en la ecuación 8.7 y resolviendo, queda:

$$T(t) = -1,05 \cdot 10^{-4}t + 21,2 + (25,3 - (-1,05 \cdot 10^{-4}t + 21,2)) \cdot e^{-(5,7 \cdot 10^{-5}) \cdot t}$$

Para $t=50400$ seg. La temperatura superficial del suelo a las 8:00h. del 17 de Abril es:

$$T = 16,4^{\circ}\text{C}$$

- Calor transmitido por el suelo

El calor total transmitido desde la desconexión a las 18:00h el día anterior hasta la conexión a las 8:00 se calcula mediante:

$$Q_t = \Sigma(\rho \cdot V \cdot C_p) \cdot (T_f - T_{ic})$$

Donde:

T_f , Temperatura superficial del suelo a las 18:00h, 24,7 °C.

T_{ic} , Temperatura superficial del suelo a las 8:00h, 16,1°C.

$\Sigma(\rho \cdot V \cdot C_p)$, Sumatorio del producto de las propiedades físicas de los materiales situados por encima del nivel de los tubos obtenido del cálculo de la tabla 7.7.

$$Q_t = 813,3 \cdot (25,3 - 16,4) = 7,2 \text{ KWh}$$

Los resultados obtenidos de la aplicación del método de la capacidad térmica global se recogen en la siguiente tabla:

<i>28 de Noviembre</i>	<i>7,1 kWh</i>
<i>28 de Diciembre</i>	<i>10,1 kWh</i>
<i>14 de Enero</i>	<i>10,4 kWh</i>
<i>12 de Febrero</i>	<i>11,25 kWh</i>
<i>8 de Marzo</i>	<i>7,9 kWh</i>
<i>16 de Abril</i>	<i>7,2 kWh</i>

Tabla 8.2. Calor transmitido por el suelo en el periodo de desconexión.

Se observa que el valor más alto corresponde al día más frío, el 12 de Febrero y los más bajos a los días con la amplitud de la temperatura interior en el periodo de desconexión más bajos, 28 de Noviembre y 16 de Abril.

9 COMPARACION DE RESULTADOS

Para la obtención del calor transmitido por el suelo durante el periodo de desconexión del sistema, desde las 18:00 horas hasta las 8:00 horas del día siguiente, hemos aplicado dos métodos diferentes, la norma UNE EN 15377 y el método de la capacidad térmica global.

Ambos métodos se someten a un régimen transitorio y se aplican al día más frío de cada mes del periodo de uso de calefacción, del 1 de Noviembre al 30 de Abril.

De la norma UNE EN 15377, partiendo de unas condiciones iniciales, tablas 7.1, 7.2 y 7.5, obtenemos los resultados de la evolución de las temperaturas, interior, superficial del suelo y a nivel de los tubos. Para ello realizamos una simulación de varios días que abarca desde siete días antes del día a estudiar, hasta el día siguiente.

Para la aplicación del método de la capacidad térmica global, en el que no consideramos el efecto de la radiación, partimos de la hipótesis de que el suelo se comporta como una sustancia sólida y, además, consideramos una temperatura uniforme en todo el suelo. La variación de la temperatura interior y la temperatura inicial utilizada de la superficie del suelo, es la obtenida de la aplicación de la norma, introduciendo estos valores obtenemos la temperatura superficial del suelo al final del periodo de desconexión.

En ninguno de los métodos se tuvo en consideración la aportación de calor debido a la radiación solar, ni por equipos eléctricos y personas.

De la aplicación de la ecuación 9.1, obtenemos la cantidad de calor transmitido durante el periodo de desconexión:

$$Q_t = \Sigma(\rho \cdot V \cdot C_p) \cdot (T_f - T_{ic}) \quad (9.1)$$

La temperatura superficial del suelo, T_f , del que parte ambos métodos en el momento de la desconexión el día anterior a las 18:00 horas, se recogen en la tabla 9.1:

27 de Noviembre	24,15°C
27 de Diciembre	26,7°C
13 de Enero	26,4°C
11 de Febrero	25,4°C
7 de Marzo	24,9°C
15 de Abril	25,3°C

Tabla 9.1. Temperatura superficial del suelo a las 18:00h del día anterior

De la aplicación de ambos métodos, la temperatura superficial del suelo, T_{ic} , en el momento de la conexión al día siguiente a las 8:00 horas, obtenemos los resultados que aparecen en la tabla 9.2:

	UNE EN 15377	CAPACIDAD TER. GLOBAL
28 de Noviembre	12,5°C	15,6°C
28 de Diciembre	11,4°C	14,5°C
14 de Enero	10,8°C	13,9°C
12 de Febrero	8,6°C	11,9°C
8 de Marzo	12,3°C	15,4°C
16 de Abril	13,6°C	16,4°C

Tabla 9.2. Temperatura superficial del suelo al día siguiente, a las 8:00 horas.

De los resultados de la tabla 9.2 observamos que la temperatura superficial del suelo en el método de la capacidad térmica global es más elevada que la de la norma, esto es debido a que en el método de la capacidad térmica no hemos considerado el efecto de la radiación, además de las hipótesis consideradas en el suelo para la aplicación del mismo. Esto implica un descenso más lento de la temperatura superficial.

Aplicando estos datos en la ecuación 9.1, obtenemos los resultados de la cantidad de calor transmitido por el suelo durante el periodo de desconexión que aparecen reflejados en la tabla 9.3:

	UNE EN 15377	CAPACIDAD TER. GLOBAL
28 de Noviembre	9,7 kWh	7,1 kWh
28 de Diciembre	12,75 kWh	10,1 kWh
14 de Enero	13 kWh	10,4 kWh
12 de Febrero	14 kWh	11,25 kWh
8 de Marzo	10,5 kWh	7,9 kWh
16 de abril	9,7 kWh	7,2 kWh

Tabla 9.3. Calor transmitido por el suelo en el periodo de desconexión en ambos métodos.

De los resultados de la tabla 9.3 observamos que, en ambos métodos, el valor más alto se corresponde con el día más frío, el 12 de febrero, y el valor más bajo, con el de la temperatura mínima exterior más alta, el 8 de Noviembre y 16 de Abril

El método de la capacidad térmica global arroja unos resultados más bajos que los de la norma UNE EN 15377, ya que de los resultados obtenidos en las tablas 9.1 y 9.2, el incremento de la temperatura superficial del suelo es más bajo en el método de la capacidad térmica, ya que no hemos tenido en cuenta la radiación, y ello implica un calor transmitido más bajo.

El calor transmitido por el suelo desde la desconexión del sistema hasta la conexión al día siguiente deberá ser aportado por el sistema de calefacción, influyendo en la demanda de calefacción del día siguiente.

Así, la demanda máxima de calefacción se producirá para el día más frío, el 12 de Febrero, en el que sumando el calor transmitido por el suelo durante el periodo de desconexión en ambos métodos, a la demanda media de calefacción obtenida en el punto 7.7.4(figura 7.17, 21,6 kWh),

nos da un valor total de 35,6 kWh según la norma y de 32,85 kWh según el método de la capacidad térmica global.

10 CONCLUSIÓN

En este proyecto hemos realizado la evaluación de un sistema de calefacción en el que se ha estudiado el efecto de la inercia térmica de muros, techo y suelo sobre la temperatura interior y la demanda de calefacción.

El sistema utilizado, calefacción por suelo radiante, está diseñado para una carga térmica de 1746,2 W. En régimen permanente, funcionará a una temperatura de impulsión del agua constante de 40°C, la temperatura media a lo largo del punto medio del plano de los tubos será de 36,85°C, se producirán unas pérdidas térmicas descendentes de 410 W y ascendente de 4887,5 W y la emisión térmica del suelo radiante será de 70 W/m².

Realizamos una simulación en régimen transitorio el día más frío de cada mes del periodo que comprende el uso de calefacción, del 1 de Noviembre al 30 de Abril. De la simulación extraemos los resultados más significativos:

- ✓ La carga máxima se produce el día más frío del periodo con un valor de 3,4 kW y una demanda térmica de calefacción máxima de 21,6 kWh.
- ✓ El sistema, con las hipótesis consideradas, es capaz de aumentar la temperatura interior a valores cercanos a la temperatura de confort para los días más fríos.
- ✓ La amplitud máxima obtenida de la temperatura interior fue de 7°C, para una amplitud máxima de la temperatura exterior de 15,2°C. Lo que pone de manifiesto la influencia de la inercia térmica sobre la temperatura interior.
- ✓ La temperatura superficial del suelo no supera el valor límite de 29°C, temperatura máxima de acuerdo a la norma UNE EN 1264.
- ✓ El calor medio transmitido por el suelo, desde la desconexión el día anterior, al local, es de 11,6 kWh/día. El calor medio transmitido por el sistema al suelo, durante el periodo de calefacción, es de 12,25 kWh/día.

Los datos que aporta la simulación, resaltan la eficiencia del sistema de calefacción por suelo radiante que, con la utilización de materiales de alta inercia térmica, favorece a la eficiencia energética del sistema.

11 BIBLIOGRAFIA

- Código técnico de la edificación (CTE) y documento básico DB-HE Ahorro de Energía.
- Norma básica de la edificación (NBE-CT-79), Condiciones térmicas en los edificios.
- Reglamento de instalaciones térmicas de los edificios (RITE)
- Pinazo Ojer José Manuel. *"Manual de Climatización"*. Universidad Politécnica de Valencia. Servicio de Publicaciones, 1995.
- Crespo Martínez, Antonio. *"Mecánica de Fluidos"*. Ediciones Paraninfo, S.A. 2006.
- Guía Técnica del Ahorro y Eficiencia Energética en Climatización.
- Jutglar i Banyeras, Luis. Miranda Barreras, Miranda. *"Técnicas de Calefacción"*, Marcombo, 2009.
- *"Manual de Calefacción por suelo radiante"*. Conaif, El Instalador, 2007.
- Incropera, Frank P. y DeWitt, David P. *"Fundamentos de Transferencia de Calor"* 4ª Ed. Prentice Hall, 1999.
- *"Manual de aire acondicionado Carrier"*. Marcombo, 1994.
- De Andrés y Rodríguez-Pomatta, J.A., Aroca Lastra, Santiago y García Gandara, Manuel. *"Calefacción y agua caliente sanitaria"*. A Madrid Vicente, 1991.
- Escalona, Vanessa. *"Incidencia de la inercia térmica en edificios de uso intermitente"*
- Sanchez-Ostiz, Ana. *"Fachadas: Cerramientos de edificios"*. El Duende, 2011.
- Datos climatológicos de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)
- Microsoft Office; Programa de cálculo Excel

Normas

- **UNE EN 100001:2001.** *Condiciones climáticas para proyectos.*
- **UNE EN 100014:2004.** *Bases para el proyecto. Condiciones exteriores de cálculo.*
- **UNE EN 12831.** *Sistemas de calefacción en edificios. Método para el cálculo de la carga térmica de diseño.*

- **UNE EN 1264.** *Sistemas de calefacción y refrigeración de circulación de agua integrados en superficies.*
- **UNE EN 12241:2010.** *Aislamiento térmico para equipos de edificación e instalaciones industriales. Métodos de cálculo.*
- **UNE EN 13790:2011.** *Eficiencia energética de los edificios. Cálculo del consumo de energía para calefacción y refrigeración de espacios.*
- **UNE EN 15377.** *Sistemas de calefacción en los edificios. Diseño de sistemas empotrados de calefacción y refrigeración por agua.*

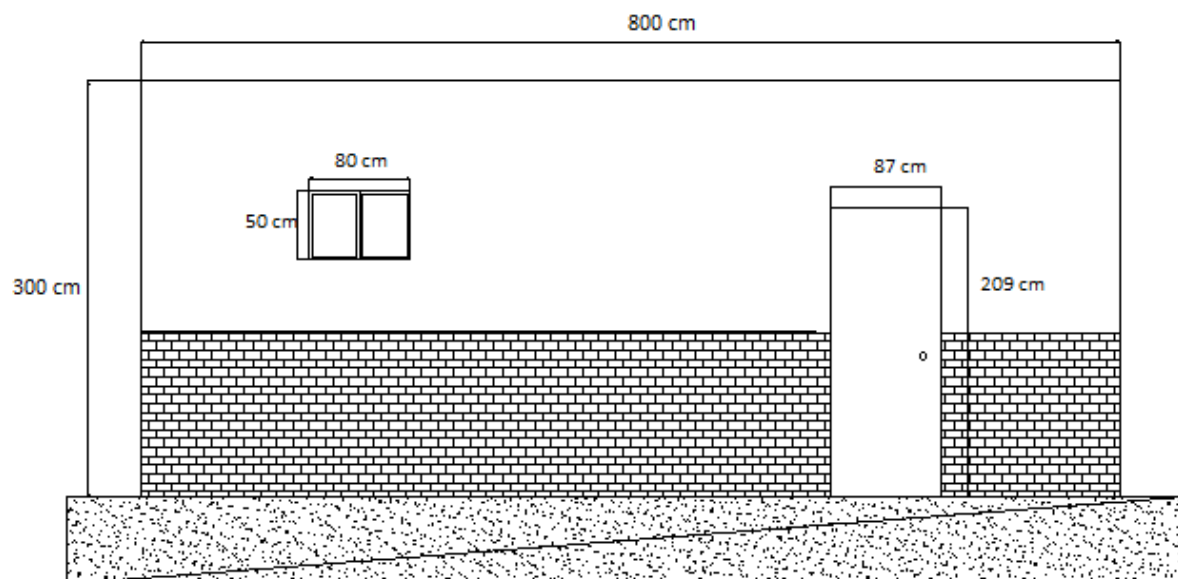
ANEXO A

T (K)	ρ (kg/m ³)	C_p (kJ/kgK)	μ (kg/m s)	ν (m ² /s)	k (W/mK)	α (m ² /s)	Pr
250	1.4128	1.0053	1.488×10^{-5}	9.49×10^{-6}	0.02227	0.1315×10^{-4}	0.722
300	1.1774	1.0057	1.983×10^{-5}	15.68×10^{-6}	0.02624	0.2216×10^{-4}	0.708
350	0.998	1.0090	2.075×10^{-5}	20.76×10^{-6}	0.03003	0.2983×10^{-4}	0.697

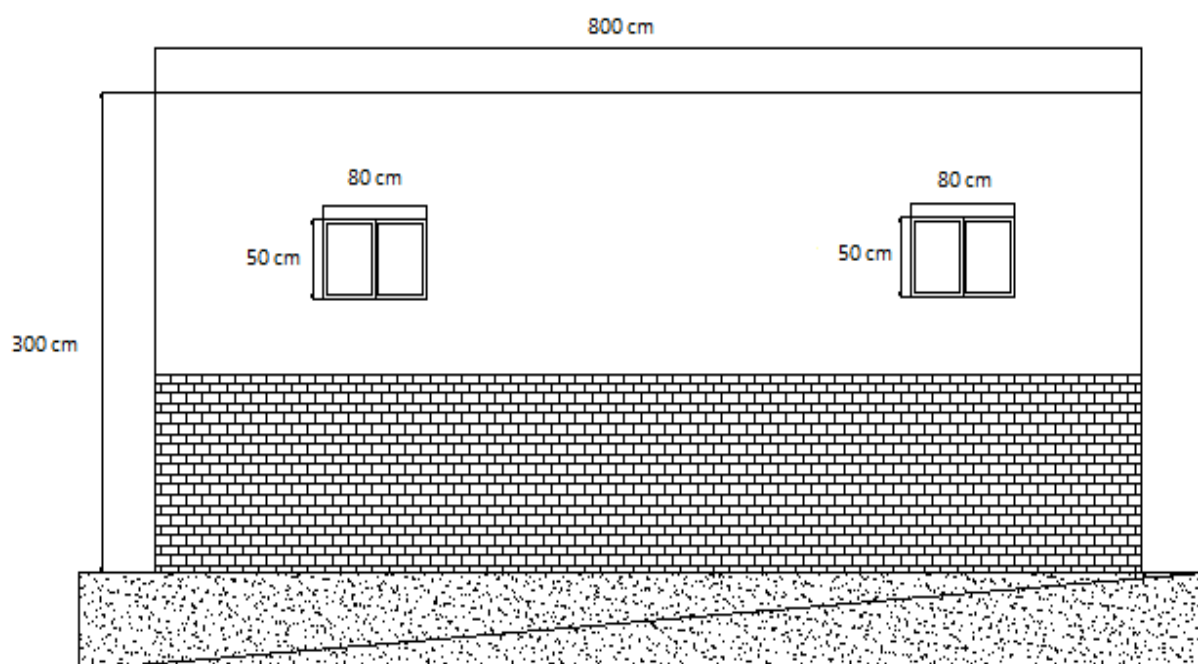
Tabla 1. Propiedades del aire a presión atmosférica para temperaturas entre 250 y 300 K

ANEXO B: Planos del local. (Medidas en centímetros)

Alzado (Vista frontal)



Vista de la parte trasera.



Planta

